



Titre: Impact de la couche MAC des réseaux sans fil locaux IEEE 802.11
Title: sur la bande passante effective des applications IP

Auteur: Cristina Ortiz
Author:

Date: 2007

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Ortiz, C. (2007). Impact de la couche MAC des réseaux sans fil locaux IEEE 802.11
Citation: sur la bande passante effective des applications IP [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8020/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8020/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

IMPACT DE LA COUCHE MAC DES RÉSEAUX SANS FIL LOCAUX IEEE 802.11
SUR LA BANDE PASSANTE EFFECTIVE DES APPLICATIONS IP

CRISTINA ORTIZ
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
JUN 2007



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-35692-0

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-35692-0

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

IMPACT DE LA COUCHE MAC DES RÉSEAUX SANS FIL LOCAUX IEEE 802.11
SUR LA BANDE PASSANTE EFFECTIVE DES APPLICATIONS IP

présenté par: ORTIZ Cristina

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. Christian Cardinal, Ph.D., président

Mme. Brunilde Sansò, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. Jean-François Frigon, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. André Girard, Ph.D., membre

*Je dédie ce mémoire à mes très chers parents :
Colombia et Eduardo*

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement ma directrice de recherche et mon codirecteur de recherche, Mme. Brunilde Sansò et M. Jean-François Frigon, pour avoir encadré ma maîtrise, pour leur soutien, leurs conseils et leur disponibilité lorsque j'en avais besoin. Aussi, je voulais remercier M. Christian Cardinal et M. André Girard pour ses commentaires du mémoire lors de la soutenance.

Toute ma gratitude à mes parents pour les efforts, leur patience et surtout leur soutien tout au long de ma maîtrise. Un grand merci car sans vous il m'aurait été bien difficile de me rendre là où je suis. Toute ma reconnaissance à ma très chère « Memé » pour son appui moral et ses encouragements. De plus, je tiens aussi à remercier mes oncles et toute ma famille pour leur soutien.

Cette expérience a été vraiment inoubliable grâce à mes trois grandes amies : Ana Patricia, qui a été toujours une amie et une « coloc » inconditionnelle ; Diana, qui a eu toujours le temps de m'aider et de me conseiller ; et Dominique, qui est celle qui a rendue ma vie plus amusante à Montréal.

Je veux aussi remercier Armelle pour tous ses encouragements et surtout pour sa bonne humeur qui rend l'ambiance de laboratoire très agréable. Bien plus qu'une collègue de travail, il s'agit d'une amie que je n'oublierai pas.

La réalisation de cette recherche a été rendue possible grâce à la participation financière de Bell Canada à travers son programme de soutien à la R-D des Laboratoires universitaires Bell et à la contribution du CRSNG.

Finalement, j'aimerais exprimer ma sincère reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidée à mener à terme cette grande expérience.

RÉSUMÉ

Les réseaux locaux sans fil IEEE 802.11 (WLANs) sont de plus en plus utilisés pour la transmission de données de différentes applications telles que les services Internet de meilleur effort (courriel, fureteur, ...) et les services multimédia comme la Voix sur IP (VoIP) ou la vidéo. Pour assurer la satisfaction des usagers, ces réseaux doivent respecter les critères de Qualité de Service (QoS) de ces applications comme le délai moyen, la gigue et les pertes.

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer l'impact du fonctionnement de la couche MAC sur la performance des réseaux sans fil IEEE 802.11. Cette évaluation est basée sur les effets perçus sur les différents critères de QoS et par la Bande Passante Effective (BPE) de chaque classe de trafic IP (VoIP, vidéo et données).

Afin d'atteindre l'objectif proposé, on étudie tout d'abord les recommandations du standard IEEE 802.11 pour comprendre le fonctionnement de la couche MAC et on établit les limites des critères de QoS de chaque classe de trafic utilisée dans cette étude. Ensuite, pour l'évaluation du système WLAN 802.11, on met en place un modèle de simulation qui suit exactement les normes du standard à l'aide du simulateur « NS Network Simulator » (NS-2).

Ce modèle de simulation permet de réaliser l'estimation du nombre maximal de connexions de chaque classe de trafic pouvant être écoulé par le réseau tout en respectant leurs critères de QoS. Cette estimation est réalisée dans les réseaux utilisant les normes 802.11b et 802.11g qui se trouvent actuellement sur le marché. De plus, les caractéristiques propres de chaque classe de trafic sont étudiées pour évaluer leur impact sur la performance des réseaux sans fil. Ces analyses servent principalement à évaluer la Bande Passante Effective (BPE) de chaque classe de trafic. Cette valeur de BPE dépend des opérations effectuées par la couche MAC, des caractéristiques de QoS et des paramètres de chaque classe de trafic, et des ressources disponibles dans le réseau.

Par la suite, nous démontrons comment la notion de BPE, utilisée auparavant dans les réseaux câblés, peut être adoptée pour mettre en place un mécanisme de Contrôle d'Admission des Connexions (CAC) efficace et simple pour les réseaux sans fil. En effet, toute nouvelle connexion peut être acceptée à partir du moment que sa BPE est inférieure à la bande passante encore disponible dans le lien. Les régions d'admission réelles obtenus combinant différentes classes de trafic sont mises en évidence en fonction des divers paramètres de chaque application. On peut alors observer que les régions d'admission réelles peuvent être approximées par des régions linéaires obtenues à partir des BPE des classes de trafic. Ces régions linéaires peuvent donc être utilisées pour réaliser le contrôle d'admission. Une méthode plus pratique et facile pour réaliser le CAC en fonction de la BPE redéfinie en paquets par seconde est aussi proposée. Cette méthode permet de réduire le nombre de paramètres influençant la BPE de la source.

Finalement, l'effet de nouvelles propositions de différenciation de services pour les réseaux sans fil (norme IEEE 802.11e) est présenté. Les résultats montrent que notre proposition de CAC est très conservative dans ces réseaux car les régions d'admission réelles ne sont plus linéaires.

ABSTRACT

Nowadays, IEEE 802.11 wireless technology has been used for data transmission of key applications, such as best effort data (Internet services) and multimedia services (Voice over IP (VoIP) and video). To insure that the users of these key applications are satisfied with the service they receive, the network must insure that the QoS criteria for these applications, such as delay, jitter, or packet loss, are met.

The main objective of this work is to evaluate the impact of the MAC layer operation on the wireless networks performance. This evaluation is carried out as a function of QoS criteria and their effects on the Effective Bandwidth (EB) of each IP traffic class (VoIP, video and DATA) are determined.

To do this, we study the MAC layer operation of IEEE 802.11 standard, and define the QoS limits of each traffic class used by the study. In order to evaluate a 802.11 WLAN network, we then implement a simulation model with "NS Network Simulator" (NS-2) following recommendations made by the standard.

This simulation model allows us to determine the maximal number of connections of each traffic class can be supported in the network while guaranteing the QoS of each source. This estimation was for 802.11b and 802.11g systems that are widely deployed in practical and commercial networks. Additionally, the impacts of every traffic class parameter over the wireless network performance are studied. Mainly, this analysis shows the Effective Bandwidth (EB) behavior of each class of trafic, and the dependency of the EB value on MAC layer operations, QoS criteria and parameters of each class of traffic, and on the availability of ressources in the network.

After this, we show how the notion of EB that has been used in wired systems can be applied easily for CAC in IEEE 802.11 networks. The rule is that a new application can be accepted on a link whenever its effective bandwidth is lower than the bandwidth still available on the link. The real admission regions with a mix of traffic classes are shown to be linear for multiples parameters of each application. By using mathematical

models based on the EB of traffic sources, we can find the linear approximations of real admission regions that could be used by CAC. We also propose a more practical method which relates CAC to packet per second effective bandwidth and reduce the number of parameters influencing the EB of a source.

Finally, the impact of a new proposal for services differentiation for wireless networks (standard IEEE 802.11e) is also presented. These results demonstrate that our CAC proposition is very conservative in these networks due to the fact that admission regions are no longer linear.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES ACRONYMES	xvii
LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES	xxi
LISTE DES TABLEAUXxxiii
LISTE DES ANNEXES	xxiv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 LE STANDARD IEEE 802.11	6
1.1 Généralités sur les WLANs 802.11	6
1.2 Les éléments des réseaux 802.11	7
1.2.1 Les groupes de services	7
1.2.2 Le Système de Distribution (DS)	9
1.3 La Couche MAC du Standard IEEE 802.11	9
1.3.1 Les défis de la couche MAC	9
1.3.2 Méthodes d'accès au médium	12

1.3.3	Distributed Coordination Function (DCF)	13
1.3.4	Point Coordination Function (PCF)	20
1.3.5	Format des trames MAC	21
1.4	Couche Physique (PHY) 802.11	21
1.4.1	Généralités de la couche PHY	21
1.4.2	Paramètres importants de la couche PHY	22
CHAPITRE 2	QUALITÉ DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX WLANS 802.11	24
2.1	Premières études réalisées sur les WLANs 802.11	24
2.2	Capacité des WLANs avec les trafics temps réel	25
2.3	Besoins de QoS dans les réseaux WLANs 802.11	28
2.4	La norme IEEE 802.11e	28
2.5	Mécanismes de Contrôle d'Admission	32
CHAPITRE 3	LES CLASSES DE TRAFIC	36
3.1	Trafics utilisés dans l'étude	36
3.1.1	Le trafic de Voix sur un réseau IP	36
3.1.2	Le trafic vidéo	39
3.1.3	Le trafic de données CBR	41
3.1.4	Le protocole de transport utilisé dans les simulations	42
3.2	Mesures de Performance	43
3.2.1	La Qualité de Service dans le réseau	43
3.2.2	Les organismes de standardisation	43
3.2.3	Les critères de QoS	44
3.2.3.1	Le Délai	44
3.2.3.2	La gigue	45
3.2.3.3	Le taux de perte des paquets	47

CHAPITRE 4	MODÉLISATION DU RÉSEAU SANS FIL 802.11	51
4.1	Les avantages du simulateur NS-2	51
4.2	Topologie du réseau de notre étude	52
4.3	Analyse des résultats des simulations obtenus en NS-2	53
4.3.1	Calcul des critères de Performance	54
4.3.2	L'intervalle de confiance utilisé	55
4.3.3	Calcul automatisé du nombre de connexions maximales	56
CHAPITRE 5	VALIDATION DU MODÈLE DE SIMULATION	58
5.1	Liste des annotations mathématiques	58
5.2	Test1 : Calcul du débit réel d'un réseau 802.11b	59
5.2.1	Temps d'overhead pour la transmission d'un paquet	59
5.2.2	Étude du débit pour un réseau WLAN 802.11	63
5.3	Test 2 : Nombre de sessions CBR pour un réseau WLAN 802.11b	64
CHAPITRE 6	LA BANDE PASSANTE EFFECTIVE	68
6.1	Explication théorique de la BPE	68
6.2	Méthodologie pour l'estimation de la BPE	70
6.2.1	Nombre maximum de sessions de VoIP	71
6.2.2	Nombre maximal de sessions Vidéo	76
6.3	BPE des applications en temps réel	77
CHAPITRE 7	UTILISATION DE LA BPE POUR LE CONTRÔLE D'AD- MISSION	79
7.1	Liste des paramètres considérés pour les simulations	79
7.2	Procédure pour évaluer les Régions d'Admission réelles	80
7.3	Régions d'admission réelles obtenues par simulation	81
7.3.1	Régions d'admission réelle pour la VoIP + CBR	81
7.3.2	Régions d'admission réelle pour la Vidéo + CBR	88

7.3.3	Régions d'admission réelle pour la Vidéo + VoIP	88
7.4	Proposition d'un mécanisme de CAC	92
7.4.1	Redéfinition des régions d'admission de VoIP + CBR	93
7.4.2	Redéfinition des régions d'admission en présence des sources vidéo	99
7.4.3	Valeurs de BPE utilisées par le mécanisme de CAC	100
7.4.4	Approximations linéaires des régions d'admission	102
7.5	Évaluation de l'impact du 802.11e	107
	CONCLUSION	116
	ANNEXES	130

LISTE DES FIGURES

FIG. 1.1	Famille des standards IEEE 802	7
FIG. 1.2	Les groupes de services : BSS et ESS	8
FIG. 1.3	Le système de distribution	9
FIG. 1.4	Le problème des noeuds cachés	11
FIG. 1.5	Le problème des noeuds exposés	12
FIG. 1.6	Architecture de la couche MAC des WLANs 802.11	12
FIG. 1.7	Procédure de « Backoff »	15
FIG. 1.8	Transmission de données entre trois STA, sans RTS/CTS	18
FIG. 1.9	Transmission de données entre trois STA, avec RTS/CTS	19
FIG. 1.10	Intervalles de répétition du CFP	20
FIG. 1.11	Architecture de la couche PHY	22
FIG. 2.1	Fonctionnement du mécanisme EDCA	30
FIG. 3.1	Fonctionnement des CODECs VoIP	38
FIG. 3.2	Échantillon de la trace vidéo	40
FIG. 3.3	Distribution des tailles de paquets vidéo	41
FIG. 3.4	Influence de la valeur du seuil de délai sur le taux de pertes	49
FIG. 4.1	Schéma du réseau simulé	52
FIG. 4.2	Communication ascendante et descendante	54
FIG. 4.3	Schéma général pour le calcul de critères de performance	55
FIG. 4.4	Organigramme du script shell nommé <i>AUTO</i>	57
FIG. 5.1	Cycle pour la transmission d'un paquet	60
FIG. 5.2	Délai moyen des flots VoIP CBR descendants	66
FIG. 6.1	Définition de la Région d'Admission	69
FIG. 6.2	Taux de pertes en fonction du nombre de VoIP	73
FIG. 6.3	Délai moyen en fonction du nombre de VoIP	73
FIG. 6.4	Gigue moyenne en fonction du nombre de VoIP	74

FIG. 7.1	Régions d'admission VoIP (10 ms) + CBR (1440 Bytes)	83
FIG. 7.2	Régions d'admission VoIP (10 ms) + CBR (128 Kbps)	84
FIG. 7.3	Impact de la direction (UP/DN) des sources CBR	85
FIG. 7.4	Régions d'admission VoIP (10 ms) + CBR DN (128 Kbps) . . .	86
FIG. 7.5	Impact de l'intervalle de paquetisation de la VoIP (payloads : 10 ms et 20 ms)	87
FIG. 7.6	Régions d'admission Vidéo UP + CBR UP pour 802.11b	89
FIG. 7.7	Régions d'admission Vidéo UP + CBR UP pour 802.11g	89
FIG. 7.8	Régions d'admission Vidéo DN + CBR UP pour 802.11b . . .	90
FIG. 7.9	Régions d'admission Vidéo DN + CBR UP pour 802.11g . . .	90
FIG. 7.10	Régions d'admission de Vidéo + VoIP	91
FIG. 7.11	Régions d'admission en termes de paquets par seconde	95
FIG. 7.12	Comportement similaire pour les régions d'admission	96
FIG. 7.13	Régions d'admission (paquets/sec) en fonction de la taille des paquets CBR	97
FIG. 7.14	Impact des sources en mode descendant pour réseaux 802.11g .	99
FIG. 7.15	Redéfinition des régions d'admission en présence des sources vidéo	100
FIG. 7.16	Approximation linéaire d'un système VoIP + CBR (802.11g) . .	105
FIG. 7.17	Approximation linéaire d'un système Vidéo + CBR (802.11g) .	105
FIG. 7.18	Approximation linéaire d'un système Vidéo + VoIP (802.11g) .	106
FIG. 7.19	Approximation linéaire Vidéo DN + CBR UP (802.11g)	106
FIG. 7.20	Taux de pertes en dépassant la région d'admission approxima- tive (802.11g)	107
FIG. 7.21	Région d'admission de 3 trafics dans un WLAN 802.11g/e . . .	110
FIG. 7.22	Région d'admission de 3 trafics dans un WLAN 802.11g/e . . .	110
FIG. 7.23	Coupures longitudinales de la région d'admission (802.11b/e) .	111
FIG. 7.24	Coupures longitudinales de la région d'admission (802.11g/e) .	111

FIG. 7.25	Exemple approximation linéaire de la région d'admission (802.11b/e)	113
FIG. 7.26	Exemple approximation linéaire de la région d'admission (802.11b/e)	113
FIG. 7.27	Comparaison performance entre les réseaux 802.11b et 802.11b/e	115
FIG. 7.28	Comparaison performance entre les réseaux 802.11g et 802.11g/e	115
FIG. I.1	Format d'une trame MAC	130
FIG. I.2	Format de la trame RTS	132
FIG. I.3	Format des trames CTS et ACK	132
FIG. III.1	Fonctionnement simplifié du Simulateur NS-2	137
FIG. III.2	Principales composantes d'un réseau en NS-2	138
FIG. VI.1	Régions d'admission VoIP + CBR (1024 Bytes) pour 802.11b .	150
FIG. VI.2	Régions d'admission VoIP + CBR (500 Bytes) pour 802.11b .	151
FIG. VI.3	Régions d'admission VoIP + CBR (100 Bytes) pour 802.11b .	151
FIG. VI.4	Régions d'admission VoIP + CBR (1024 Bytes) pour 802.11g .	152
FIG. VI.5	Régions d'admission VoIP + CBR (500 Bytes) pour 802.11g .	153
FIG. VI.6	Régions d'admission VoIP + CBR (100 Bytes) pour 802.11g .	153
FIG. VII.1	Régions d'admission VoIP + CBR (512 Kbps) pour 802.11b .	154
FIG. VII.2	Régions d'admission VoIP + CBR (1 Mbps) pour 802.11b .	155
FIG. VII.3	Régions d'admission VoIP + CBR (2 Mbps) pour 802.11b .	155
FIG. VII.4	Régions d'admission VoIP + CBR (4 Mbps) pour 802.11b .	156
FIG. VII.5	Régions d'admission VoIP + CBR (512 Kbps) pour 802.11g .	157
FIG. VII.6	Régions d'admission VoIP + CBR (1 Mbps) pour 802.11g .	157
FIG. VII.7	Régions d'admission VoIP + CBR (2 Mbps) pour 802.11g .	158
FIG. VII.8	Régions d'admission VoIP + CBR (4 Mbps) pour 802.11g .	158
FIG. VIII.1	Régions d'admission VoIP + CBR DN (128 Kbps) pour 802.11b	160
FIG. VIII.2	Régions d'admission VoIP + CBR DN (512 Kbps) pour 802.11b	161
FIG. VIII.3	Régions d'admission VoIP + CBR DN (1 Mbps) pour 802.11b .	161
FIG. VIII.4	Régions d'admission VoIP + CBR DN (2 Mbps) pour 802.11b .	162
FIG. VIII.5	Régions d'admission VoIP + CBR DN (4 Mbps) pour 802.11b .	162

FIG. VIII.6	Régions d'admission VoIP + CBR DN (512 Kbps) pour 802.11g	163
FIG. VIII.7	Régions d'admission VoIP + CBR DN (1 Mbps) pour 802.11g	163
FIG. VIII.8	Régions d'admission VoIP + CBR DN (2 Mbps) pour 802.11g	164
FIG. VIII.9	Régions d'admission VoIP + CBR DN (4 Mbps) pour 802.11g	164
FIG. IX.1	Régions d'admission VoIP + CBR DN (1024 Bytes) pour 802.11b	165
FIG. IX.2	Régions d'admission VoIP + CBR DN (500 Bytes) pour 802.11b	166
FIG. IX.3	Régions d'admission VoIP + CBR DN (100 Bytes) pour 802.11b	166
FIG. IX.4	Régions d'admission VoIP + CBR DN (1024 Bytes) pour 802.11g	167
FIG. IX.5	Régions d'admission VoIP + CBR DN (500 Bytes) pour 802.11g	167
FIG. IX.6	Régions d'admission VoIP + CBR DN (100 Bytes) pour 802.11g	168

LISTE DES ACRONYMES

AC	Access Categories
ACK	Acknowledgment (Acquittement)
AP	Access Point (Point d'accès)
BSA	Basic Service Area
BSS	Basic Service Set
CBR	Constant Bit Rate (Sources de taux constant)
CRC	Cyclic Redundancy Code (Code de Redondance Cyclique)
CFP	Contention Free Period
CS	Carrier Sense
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTS	Clear to Send
CW	Contention Window (Fenêtre de Contention)
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	DCF InterFrame Space
DN	Downlink (Liens descendants)
DS	Distribution System
DSS	Distribution System Service
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EIFS	Extended InterFrame Space
ESS	Extended Service Set
ESA	Extended Service Area
E2E	End to end Delay
FH	Frequency Hopping
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum

FIFO	First IN, First OUT
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GOP	Group of Pictures
IBSS	Independent Basic Service Set
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IFS	Interframe Space (Espace inter-frames)
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Science and Medicine bands
LAN	Local Area Networks (Réseaux Locaux)
LLC	Logical Link Control (Contrôle du Lien Logique)
MAC	Medium Access Control (Contrôle d'accès au médium)
MPEG	Moving Picture Experts Group
NAV	Network Allocation Vector
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PC	Point Coordinator
PCF	Point Coordination Function
PHY	Physical Layer (Couche Physique)
PIFS	PCF InterFrame space
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
PMD	Physical Medium Dependent
QoS	Quality of Service (Qualité de Service)
RTS	Request to Send
SIFS	Short InterFrame Space
STA	Station de communication
TCP	Transmission Control Protocol

UDP	User Datagram Protocol
UIT	Union Internationale de Télécommunications
UNII	Unlicensed National Information Infrastructure bands
UP	Uplink (Liens ascendants)
VO	Objets de Vidéo
VoIP	Voice over IP
VOP	Vidéo Object Planes
WAN	Wide Area Network
WDM	Wireless Distribution Media
WLAN	Wireless Local Area Network
WM	Wireless Medium

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

C	Capacité du canal (Kb/s)
D_{cod}	Taux de transmission du CODEC
L_{pq}	Taille de chaque paquet transmis par le CODEC
n_{max}^e	Nombre maximum de connexions de VoIP (sources CBR) expérimentales
n_{max}^t	Nombre maximum de connexions de VoIP (sources CBR) théoriques
N_i^*	Nombre de connexions maximales admises d'une classe de trafic i
P_{col}	Probabilité de collisions dans le canal sans fil
R_{don}	Taux de transmission de paquets de données
R_{cont}	Taux de transmission de paquets de contrôle
R_i	Valeur du compteur du backoff d'une station i
t_{ACK}	Temps de transmission d'un paquet ACK
t_{CTS}	Temps de transmission d'un paquet CTS
t_{DATA}	Temps pour envoyer une trame de données
t_{int}	Intervalle de paquetisation du CODEC
t_{slot}	Temps d'un « slot time »
t_{RTS}	Temps de transmission d'un paquet RTS
t_{cycle}	Temps d'un cycle pour la transmission d'un paquet
t_P	Temps pour envoyer un paquet de P bytes
$t_{overhead}$	Temps supplémentaire dans une transmission
t_{fixe}	Partie du temps supplémentaire qui est constante
t_{BCK}	Partie du temps supplémentaire du processus de backoff
t_{PHY}	Temps de transmission de l'entête de la couche physique
t_s	Temps total de simulation
$t_{UDP/IP/MAC}$	Temps de transmission des entêtes des protocoles

W_e	Débit expérimental obtenu par simulations (Mb/s)
W_i	BPE d'une source de classe de trafic i (Kb/s)
W_t	Débit théorique du canal (Mb/s)
β	Quantité de bits reçus expérimentalement par la destination
γ	Nombre de paquets par seconde qu'une source émet
γ_i^*	Nombre maximal de paquets par seconde admis d'une classe de trafic i
$\gamma_{i,j}$	Nombre maximal de paquets par seconde admis d'une classe de trafic i et de paramètre j
γ_{max}^t	Nombre de paquets par seconde théorique qu'une source CBR émet
ε	Erreur relative
η	Nombre de « slots time » disponibles dans le canal sans fil
ρ	Débit moyen duplex d'un CODEC pour une connexion
θ_i	BPE d'une source de classe de trafic i (Kbits/paquet)
$\theta_{i,j}$	BPE d'une source de classe de trafic i et de paramètre j (Kbits/paquet)

LISTE DES TABLEAUX

TAB. 1.1	Caractéristiques des normes 802.11x	23
TAB. 1.2	Paramètres de la couche PHY	23
TAB. 2.1	Paramètres pour chaque AC de la norme 802.11e	31
TAB. 3.1	Paramètres des CODECs utilisés dans les simulations	38
TAB. 3.2	Statistiques de la trace vidéo MPEG-4 utilisée	41
TAB. 3.3	Valeurs maximales des délai utilisées dans l'étude	45
TAB. 3.4	Valeurs maximales de la gigue utilisées dans l'étude	47
TAB. 3.5	Valeurs Maximales de Pertes utilisées dans l'étude	50
TAB. 5.2	Overhead fixe par paquet envoyé pour les réseaux 802.11b . . .	61
TAB. 5.3	Temps total d'overhead par paquet envoyé	62
TAB. 5.4	Résultats obtenus de la variation du débit	64
TAB. 6.1	Nombre maximal de sessions VoIP	75
TAB. 6.2	Nombre maximal de sessions vidéo	76
TAB. 6.3	BPE (bits/sec) des trafics VoIP	77
TAB. 6.4	BPE (bits/sec) des trafics Vidéo	78
TAB. 7.1	Nombre maximal de paquets/seconde CBR	98
TAB. 7.2	BPE expérimentale (Kbits/paquet) des différents classes de trafic	101
TAB. V.1	Champs d'un fichier de trace d'un réseau câblé	146
TAB. V.2	Champs d'un fichier de trace d'un réseau WLAN	147

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I	FORMAT DES TRAMES	130
ANNEXE II	TECHNIQUES POUR LA TRANSMISSION DE DONNÉES	134
ANNEXE III	LE SIMULATEUR NS-2	136
III.1	Généralités	136
III.2	Les composantes d'un réseau en NS-2	137
ANNEXE IV	LES PRINCIPALES INSTRUCTIONS DU SCRIPT	140
ANNEXE V	ANALYSE DE LA TRACE DE LA SIMULATION	145
ANNEXE VI	LES RÉGIONS D'ADMISSION DE VOIP + CBR - VARIA- TION DU DÉBIT DES SOURCES CBR	150
ANNEXE VII	LES RÉGIONS D'ADMISSION DE VOIP + DATA - VARIA- TION DE LA TAILLE DES PAQUETS CBR	154
ANNEXE VIII	LES RÉGIONS D'ADMISSION DE VOIP + DATA - SOURCES CBR EN MODE DESCENDANT	159
ANNEXE IX	LA REDÉFINITION DES RÉGIONS D'ADMISSION DE VOIP + DATA - SOURCES CBR EN MODE ASCENDANT	165

INTRODUCTION

De nos jours, la technologie de réseaux sans fil WLAN 802.11 devient de plus en plus populaire pour la transmission de données en complément aux réseaux câblés de haut débit (IEEE 802.x). L'utilisation des réseaux sans fil est très répandue pour la connexion de différents dispositifs mobiles, ordinateurs portables ou PDAs, à une infrastructure câblée déjà existante dans les entreprises, les maisons ou les endroits publics comme les aéroports, les hôtels, etc. Cette popularité découle de l'avantage de posséder une connexion au réseau sans utiliser des câbles intermédiaires, offrant ainsi un avantage de mobilité et de liberté pour les usagers.

Le standard 802.11, développé par l'IEEE [1], définit les caractéristiques de la couche physique (couche PHY) et de la sous-couche liaison d'accès au médium (couche MAC ou Medium Access Control Layer) pour réaliser des transmissions sans fil. Cette norme établit la configuration d'une seule couche MAC pour trois technologies différentes de la couche PHY : deux d'entre elles utilisent la radio et la troisième utilise l'infra-rouge. Des modifications récentes de la norme de base, qui transmettait à l'origine de 1 à 2 Mbps, permettent aujourd'hui d'avoir un débit du canal variant de 11 à 54 Mbps. Des débits encore plus élevés, jusqu'à 720 Mbps, sont envisagés dans le futur.

Cet avantage d'un environnement sans fil a pour conséquence d'apporter plus de contraintes pour les transmissions comparativement aux réseaux câblés. Des contrôles supplémentaires doivent être effectués lorsque surviennent des pertes de paquets. Celles-ci sont plus nombreuses puisque les ondes radio dans les systèmes sans fil souffrent de plus d'interférences dues à la co-existence de plusieurs systèmes sans fil ainsi qu'aux chemins multiples et aux ombrages. D'autres problèmes s'additionnent, notamment au niveau de la couche MAC, avec le partage du médium sans fil entre plusieurs usagers et en présence d'une topologie dynamique due au mouvement des stations (STAs). Ces

problèmes entraînent donc une dégradation de la transmission pour une application dans un environnement sans fil comparée à un système câblé avec le même débit.

D'autre part, la convergence des différents services comme la voix, la vidéo et les données sur un seul réseau est de plus en plus courante alors qu'auparavant, chaque application utilisait son propre réseau de transmission. Cette convergence sera aussi demandée dans les réseaux sans fil où les flots des différentes classes de trafic, comme la Voix ou la Vidéo sur IP, doivent aussi être transmis, en plus du trafic IP meilleur effort. En effet, cette intégration avec des trafics en temps réel permet une meilleure utilisation de la bande passante en raison du multiplexage statistique ainsi qu'une amélioration des coûts. Cependant, les réseaux doivent satisfaire aux importantes contraintes de Qualité de Service (QoS) requises par les usagers surtout pour ces applications en temps réel. Cette tâche devient difficile à accomplir dans les réseaux sans fil 802.11 qui ont été conçus comme des réseaux de *meilleur effort* sans garanties de transmission. Dans ce contexte, une étude qui évalue la performance de services avec des contraintes de QoS dans un réseau 802.11 est de mise. De plus, il est nécessaire de souligner quel est le rôle que joue le fonctionnement de la couche MAC sur la performance des ces réseaux à supporter des trafics ayant des contraintes de QoS.

Objectif du travail

Le premier objectif de ce projet de recherche est d'évaluer l'impact du fonctionnement de la couche MAC sur la performance des réseaux WLAN 802.11. Cette évaluation sera basée sur les effets perçus dans les applications en temps réel en termes de différents critères de Qualité de Service (QoS) comme le délai, la gigue et les pertes. L'évaluation de cette performance sera donc effectuée en présence de différentes applications ou classes de trafic telles que les données de basse priorité et les applications multimédia de haute priorité (VoIP ou la vidéo). Pour faire suite à cet objectif, la capacité maximale des

réseaux sans fil WLANs (IEEE 802.11) en termes du nombre maximal de connexions admises selon chaque classe de trafic sera présentée.

Une approche permettant de maintenir la QoS pour les usagers actuels du système en présence de nouvelles connexions est la mise en place d'un mécanisme de Contrôle d'Admission des Connexions (CAC du nom en anglais « Connection Admission Control »). Cette étude cherche donc à établir la faisabilité d'un mécanisme de CAC pour les réseaux sans fil locaux qui se retrouvent actuellement sur le marché : les normes IEEE 802.11b et IEEE 802.11g. La proposition présentée dans ce mémoire découle d'un modèle précédent, utilisé par les réseaux ATM et réseaux IP câblés [2, 3], qui utilise la notion de Bande Passante Effective (BPE) pour réaliser le mécanisme de CAC.

Finalement, le nouveau standard des réseaux sans fil (IEEE 802.11e) vise à améliorer la QoS de ces réseaux de *meilleur effort*. L'impact sur la performance des réseaux WLANs de cette nouvelle proposition, qui suggère un mécanisme de différenciation des services, sera exposé. Par la suite, l'effet de mettre en oeuvre la différenciation des services sur le mécanisme de CAC sera aussi mis en évidence.

Solution proposée

Les simulations sont des outils informatiques qui permettent la reconstitution d'un système réel par un système simplifié similaire. Les études expérimentales utilisent ces outils pour analyser certains des paramètres d'intérêt du système. Dans ce projet, nous utilisons un simulateur par ordinateur de réseau sans fil 802.11. Le simulateur de réseaux NS-2 permet, entre autres, d'évaluer la performance des réseaux sans fil de la couche physique à la couche transport. Dans ce contexte, les simulations fixeront le nombre de connexions maximales de chaque classe de trafic (voix, vidéo ou données) écoulees

par les réseaux 802.11 et conditionnées aux strictes limites des critères de performance (délai, gigue et pertes) établies pour maintenir la QoS.

La mise en place d'un mécanisme de contrôle d'admission pour les réseaux WLAN 802.11 sera envisagée à partir de l'estimation expérimentale de la capacité des réseaux 802.11 exprimée comme le nombre de connexions qui peuvent être supportés tout en maintenant la QoS. L'établissement de ce mécanisme permettra de décider si un nouveau flot est capable de recevoir la QoS demandée avant même d'établir sa connexion au système. Le schéma de CAC proposé repose sur l'utilisation de bande passante affectée à une session pendant sa connexion au réseau, nommée sa *Bande Passante Effective (BPE)*, comme critère d'admission dans le système. Cette valeur de BPE de chaque classe de trafic est mesurée par simulation en fonction de l'opération de la couche MAC, des contraintes de QoS et des ressources disponibles dans le réseau. Le simulateur permettra aussi d'établir les *régions d'admissions* de différentes classes de trafic (voix/vidéo/données) pour préciser la faisabilité du mécanisme de CAC.

Organisation du travail

L'organisation et les résultats de ce travail sont exposés en suivant huit parties principales. Le chapitre 1 présente le fonctionnement général des réseaux sans fil WLAN 802.11 suivi du chapitre 2 qui expose une revue de littérature des travaux antérieurs dans les domaines connexes ainsi que les caractéristiques de performance et de Qualité de Service (QoS). Le chapitre 3 décrit les classes de trafic utilisés dans notre étude. Par la suite, le chapitre 4 donne un aperçu du simulateur utilisé ainsi que de l'environnement des simulations. Le chapitre 5 expose les validations réalisées des programmes développés pour le prototype du réseau 802.11. Le chapitre 6 présente les valeurs de la Bande Passante Effective (BPE) obtenues par simulation pour chacune des classes de trafic, puis les détails de la procédure du mécanisme de Contrôle d'Admission des Connexions

(CAC) seront exposés dans le chapitre 7. Finalement, ce mémoire se termine avec les conclusions et les perspectives futures de ce domaine de recherche.

CHAPITRE 1

LE STANDARD IEEE 802.11

Ce chapitre présente les caractéristiques et détails du standard IEEE 802.11. Les généralités et les éléments de ces réseaux sont décrits dans la section 1.1 et la section 1.2 respectivement. Le fonctionnement de la couche MAC est analysé en profondeur dans la section 1.3. Finalement, la section 1.4 présente une courte description de la couche PHY.

1.1 Généralités sur les WLANs 802.11

La norme IEEE 802.11 est un standard international décrivant les caractéristiques de réseaux locaux sans fil, connus comme *réseaux WLAN (Wireless LAN)*. De façon analogue aux réseaux filaires LAN 802.x (comme IEEE 802.3 (Ethernet) ou IEEE 802.5 (Token Ring)), le standard 802.11 est une norme qui détaille les deux premières couches du modèle OSI (voir Figure 1.1). Celles-ci permettent l'accès au medium, le transfert des données, la mobilité des stations de communication (STAs) au niveau de la couche MAC et la transmission/réception des données au niveau de la couche PHY ; quatre activités qui sont transparentes aux couches supérieures. Mais contrairement aux réseaux LAN, les WLAN 802.11 ou réseaux WI-FI (de son nom en anglais Wireless-Fidelity) transmettent les données par radiations électromagnétiques ou ondes infra-rouges qui est, par contre, une technique peu utilisée. Les ondes radio qui se propagent sont transmises dans les bandes de fréquences sans license 2.4Ghz (« ISM : Industrial, Science and Medicine ») et 5 Ghz (« UNII : Unlicensed National Information Infrastructure »).

La norme originale a subi plusieurs modifications au cours des années, dans le but d'améliorer la performance des réseaux sans fil. Les modifications affectent différents

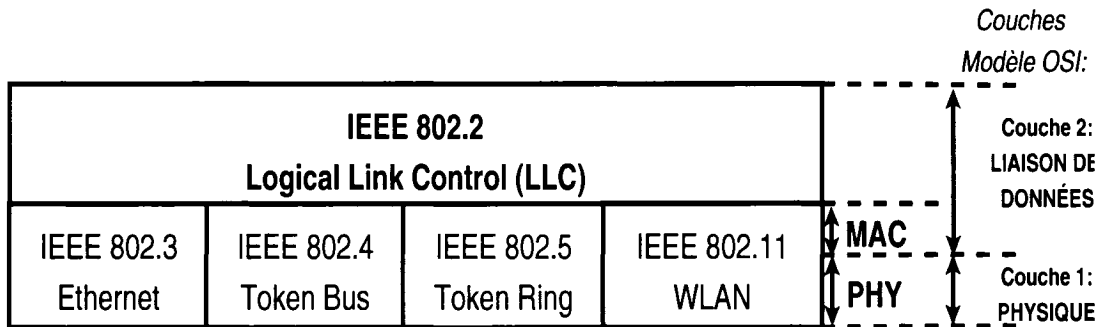


FIG. 1.1 Famille des standards IEEE 802

domaines comme la vitesse de transmission (les normes 802.11a, 802.11b, 802.11g), la sécurité (802.11i) et la qualité de service (802.11e) dans les réseaux sans fil. Finalement, un nouveau standard, l'IEEE 802.11n, envisage des améliorations à la couche PHY et MAC pour pouvoir transmettre à un débit supérieur à 100 Mbps.

1.2 Les éléments des réseaux 802.11

La norme établit l'existence de plusieurs éléments fondamentaux pour la création d'un réseau sans fil et la transmission de données. Parmi ces éléments, on trouve les groupes de service qui correspondent aux architectures possibles du réseau sans fil et le système de distribution.

1.2.1 Les groupes de services

La plus simple unité d'un réseau 802.11, le « Basic Service Set » (BSS), est un groupe de stations qui communiquent entre elles. Les communications sont mises en place à l'intérieur d'une surface de couverture qui est la « Basic Service Area » (BSA). Les BSS peuvent être organisés en réseaux indépendants ou en réseaux avec infrastructure. L'union de plusieurs BSS forment le « Extended Service Set » (ESS), (voir Figure 1.2).

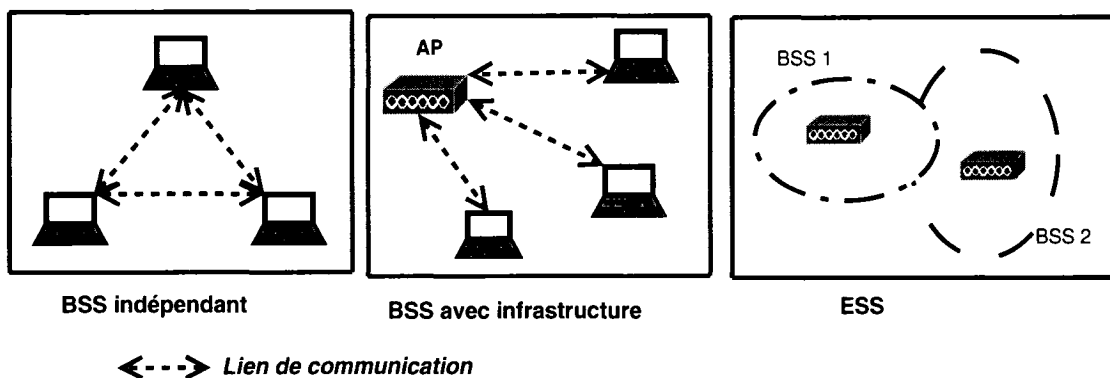


FIG. 1.2 Les groupes de services : BSS et ESS

Les BSS indépendants (IBSS) ou réseaux ad hoc.- Il s'agit d'un minimum de deux stations qui communiquent directement entre elles. Typiquement les IBSS sont créés avec un but spécifique, sans aucune planification et pour une courte durée. Pour cette raison, les IBSS sont aussi connus comme « réseaux Ad-Hoc ».

Le BSS avec infrastructure.- Ces réseaux se distinguent par la présence d'un point d'accès (AP) ou station de base. Lorsque deux stations dans une même surface de service veulent communiquer entre elles, elles doivent passer par l'AP, en créant une communication ascendante (UP) et une descendante (DN). Dans les réseaux avec infrastructure, toutes les stations doivent être associées à un seul AP à la fois pour obtenir les services du réseau.

Les ESS.- Il s'agit de l'union de plusieurs BSS qui communiquent entre eux. La surface de couverture ou « Extended Service Area » (ESA) est plus grande que celle de chacun des BSS. Cette architecture étendue a besoin d'un réseau dorsal appelé le *système de distribution (DS)* pour permettre la communication entre toutes les stations des différents BSS. Le déplacement des stations dans un même ESS est transparent pour les couches supérieures.

1.2.2 Le Système de Distribution (DS)

La communication entre les différents BSS d'un ESS dépend du système de distribution (DS) qui doit offrir le support nécessaire pour leur intégration sans coupure de communication et permettre la mobilité des stations associées. Le DS permet également l'intégration avec d'autres réseaux câblés, à travers un portail comme l'Internet public (Figure 1.3). Le système de distribution est défini en termes des services offerts aux stations sans fil. En effet, le DS est responsable de repérer la localisation physique d'une station, de permettre sa mobilité et de délivrer correctement les trames.

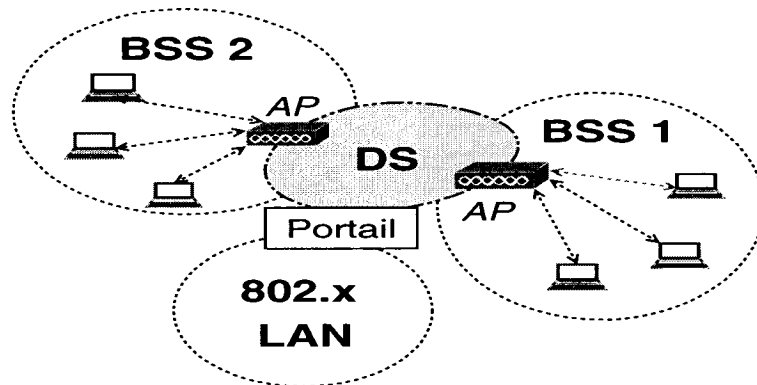


FIG. 1.3 Le système de distribution

1.3 La Couche MAC du Standard IEEE 802.11

1.3.1 Les défis de la couche MAC

Les réseaux sans fil éprouvent des problèmes de transmission de données qui n'existaient pas dans les réseaux câblés. C'est le cas des transmissions radio qui utilisent des bandes de fréquence sans licence, comme par exemple les WLANs 802.11. Tout d'abord, la couche MAC est responsable de gérer l'accès des multiples stations au lien partagé.

Dans les réseaux câblés, les périphériques transmettent des paquets et gèrent les collisions en même temps. Les systèmes radio, par contre, ne peuvent pas écouter le canal et transmettre simultanément. Pour éviter les collisions, la station qui veut communiquer vérifie d'abord la disponibilité du lien s'il n'y a pas de transmissions en cours, pendant un temps aléatoire pour ensuite commencer sa transmission. De plus, l'existence de chemins multiples d'ondes radio, des interférences d'autres dispositifs et sources radio, ou la présence de zones sombres provoquent des atténuations du signal reçu et provoquent un plus grand nombre d'erreurs dans la transmission à travers la couche PHY sans fil. Pour éviter ces inconvénients et vérifier qu'il n'y a pas eu des collisions, la couche MAC des réseaux 802.11 WLAN a été conçue de sorte que pour toutes les trames correctement reçues, la station destination retransmet un accusé de transmission (ACK) à la station source pour l'informer du succès de la transmission. Dans le cas contraire, il y aura une retransmission de la trame et ce phénomène se répète jusqu'à un nombre maximal d'envois établi par le standard [1].

D'autre part, la portée d'une communication sans fil est aléatoire. Il se peut donc que certaines stations ne puissent pas détecter la présence d'autres stations aux alentours : il s'agit alors du problème des **noeuds cachés**. Étant donné qu'une station ne détecte pas la présence d'une autre station, elle ne peut pas détecter non plus les transmissions possibles en cours. Comme le montre la Figure 1.4, la STA B peut communiquer avec la STA A et la STA C, mais il n'existe pas de communication directe entre ces deux dernières stations à cause de l'éloignement de l'une par rapport à l'autre. Pour la STA A, la STA C représente un *noeud caché* et vice-versa. La probabilité d'une transmission simultanée de ces deux stations ne peut pas être négligée, ce qui peut provoquer plusieurs collisions difficiles à éviter. Plus de détails sur le problème des noeuds cachés se trouvent dans [4, 5]. Pour résoudre ce problème, on utilise un accès au médium modifié avec l'utilisation des trames de contrôle « request to send/clear to send » (RTS/CTS) pour la réservation du médium. Cette méthode, décrite avec précision dans la Section 1.3.2,

n'est pas toujours mise en place car elle provoque une augmentation des délais dans la transmission.

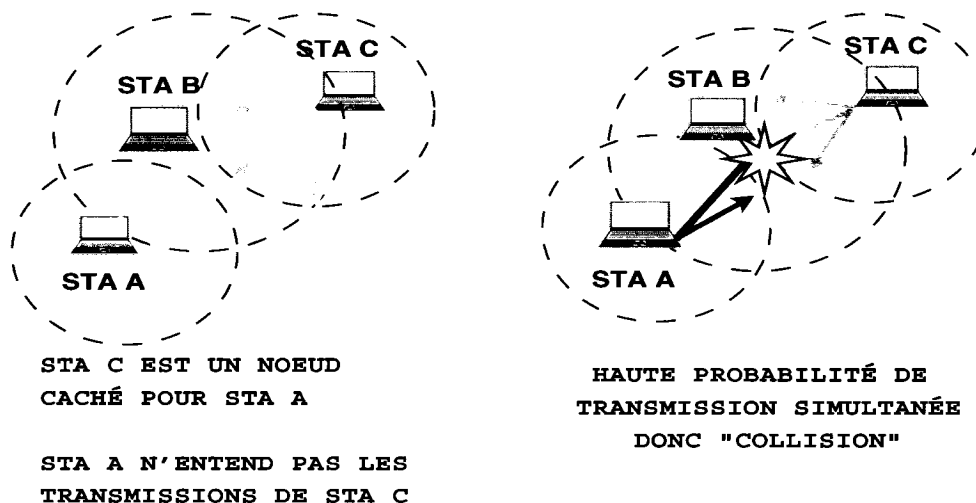


FIG. 1.4 Le problème des noeuds cachés

D'autre part, le phénomène des **noeuds exposés** est le contraire du phénomène des noeuds cachés. Ce problème a lieu lorsque certaines stations sont incapables de communiquer entre elles même s'il n'y a pas d'interférence avec la transmission en cours entre autres stations. Dans l'exemple de la Figure 1.5, la STA C est en train de communiquer avec la STA D. Quand la STA B veut communiquer avec la STA A, elle détecte l'activité de la STA C dans le canal donc elle attend la disponibilité du canal. Or la communication entre la STA B et la STA A n'affecte pas la transmission en cours de la STA C. Cette perte de bande passante est un problème qui n'est encore réglé par la norme 802.11.

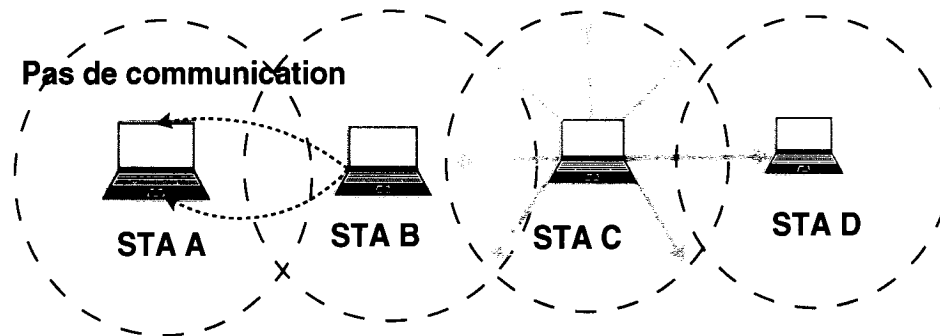


FIG. 1.5 Le problème des noeuds exposés

1.3.2 Méthodes d'accès au médium

Le travail principal de la couche MAC est d'établir les normes pour que plusieurs stations puissent avoir accès au médium et transmettre les données ; elle utilise des mécanismes de coordination d'accès au canal. On retrouve deux variantes : la première, appelée « Distributed Coordination Function (DCF) » ou méthode d'accès avec contention, est une méthode obligatoire pour tous les dispositifs WLAN 802.11, et la deuxième, nommée « Point Coordination Function (PCF) » ou mécanisme d'accès sans contention, est une méthode optionnelle car elle peut ou non être installée sur les dispositifs 802.11. Ces deux dernières méthodes sont différentes mais le PCF a besoin des services du DCF pour fonctionner (Figure 1.6).

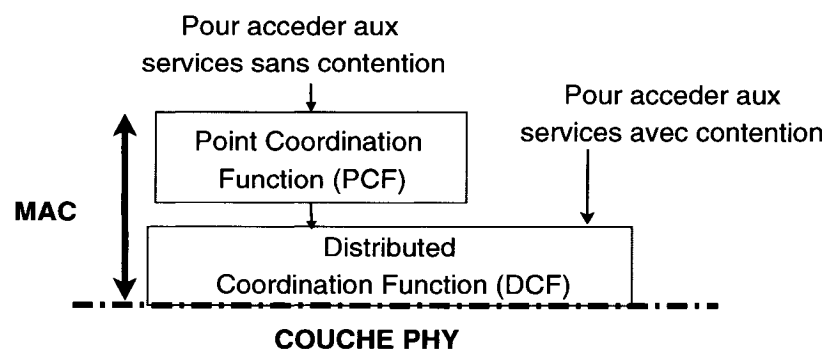


FIG. 1.6 Architecture de la couche MAC des WLANs 802.11

Le DCF, basé sur le protocole « Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance » (CSMA/CA), a été développé comme un mécanisme de *meilleur effort*. En d'autres termes, les paquets reçoivent le meilleur traitement possible en fonction de l'état du réseau mais sans garantir une transmission fiable et toutes les stations ont la même probabilité de transmission de données. Il peut être mis en place de deux façons différentes : par un fonctionnement simple ou par l'utilisation de trames de contrôle auxiliaires RTS et CTS afin d'éviter le phénomène de noeuds cachés. Le PCF offre des services sans contention. Elle a été conçue pour la transmission des trafics avec différentes priorités. Dans cette structure, les APs nommés « Points Coordinators » (PC) assurent la disponibilité du médium pour une transmission. Il s'agit d'un schéma basé sur des requêtes, dans lequel le PC détermine quelle STA aura accès au médium en lui donnant une autorisation de transmission. Notre étude se concentre sur le fonctionnement de la méthode DCF car le PCF est une méthode d'accès optionnelle qui est peu répandue dans les dispositifs 802.11 WLANs.

1.3.3 Distributed Coordination Function (DCF)

Le DCF permet le partage automatique du médium entre plusieurs stations selon le mécanisme CSMA/CA. Il établit des temps d'attente aléatoires pour chaque STA afin de réduire les collisions.

Le Mécanisme CSMA/CA.- est un protocole aléatoire de contention pour l'accès au médium. Dans ce mécanisme, les noeuds s'assurent de l'absence d'autres transmissions avant de transmettre les données d'intérêt. Cette vérification diminue la probabilité de collision. Lorsque le transmetteur détecte la présence d'un signal encodé provenant d'une autre station avant de lancer sa propre transmission de données, on parle de « Car-

rier Sense » ou détection de porteuse. Le « Multiple Access », ou accès multiple, décrit le partage du même médium par plusieurs stations. Finalement, les dispositifs sans fil ne sont pas capables d'émettre et de recevoir des signaux simultanément. Ils ne sont donc pas capables de détecter les collisions dans le lien comme dans le mécanisme « Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection ». Pour cette raison, les stations doivent attendre un accusé de réception pour chaque trame envoyé pour déterminer si une collision a eu lieu. Si l'accusé n'est pas reçu dans un délai imposé par la norme, la station suppose qu'il y a eu une collision et utilise un mécanisme pour éviter une collision lors de la retransmission (« Collision Avoidance »).

La détection de la porteuse et le vector NAV.- déterminent la disponibilité du médium pour une transmission. La norme IEEE 802.11 établit deux mécanismes de détection : une fonction d'écoute physique de la couche PHY et une fonction d'écoute virtuelle de la couche MAC. La fonction d'écoute physique reconnaît la présence d'autres usagers en considérant l'activité dans le canal. La fonction d'écoute virtuelle de chaque STA utilise par contre le « Network Allocation Vector » (NAV) qui est un indicateur de la durée de temps d'occupation du médium. L'information du champ de *DURÉE* des trames envoyées est celle qui est utilisée pour établir la valeur de cet indicateur NAV. Avant de permettre une transmission, les deux mécanismes de détection doivent s'assurer que le médium est disponible (IDLE).

Le temps entre les trames.- La coordination de l'accès au médium se fait à travers l'utilisation d'intervalles de temps entre les transmissions de trames. Ces intervalles portent le nom d'*Espaces inter-trames* ou IFS de l'anglais « Interframe Space » et ils ont des durées indépendantes des taux de transmission de données. La norme définit quatre différents IFS, décrits en ordre croissant de durée, pour la transmission des trames :

1. Le SIFS (« Short interframe space ») utilisé pour les transmissions de trames de contrôle (ACK, RTS et CTS).

2. Le PIFS (« PCF interframe space ») utilisé par le fonctionnement du PCF.
3. Le DIFS (« DCF interframe space ») utilisé par la fonction DCF.
4. L'EIFS (« Extended interframe space ») de durée non fixe et utilisé en présence des erreurs dans les transmissions.

La procédure de « Backoff » et la phase de Contention.- La procédure de backoff détermine une période de temps d'attente aléatoire et exponentielle pour chaque station qui veut utiliser le médium pour une transmission. Ce temps est connu comme le « Backoff Time » et il se met en place dans chaque station après les intervalles de temps DIFS ou EIFS. Le temps de « Backoff » est équivalent à un entier pseudo-aléatoire, « R » dans la Figure 1.7, choisi indépendamment selon une distribution uniforme dans l'intervalle $[0, CW]$, multiplié par la valeur d'un « slot time » ou période de temps. La valeur CW, du nom en anglais « Contention Window », correspond à la taille de la fenêtre de contention qui est un entier contenu dans l'intervalle $[CW_{min}, CW_{max}]$. Les valeurs de CW_{min} , CW_{max} et la valeur du « slot time » (t_{slot}) sont des paramètres de la couche PHY.

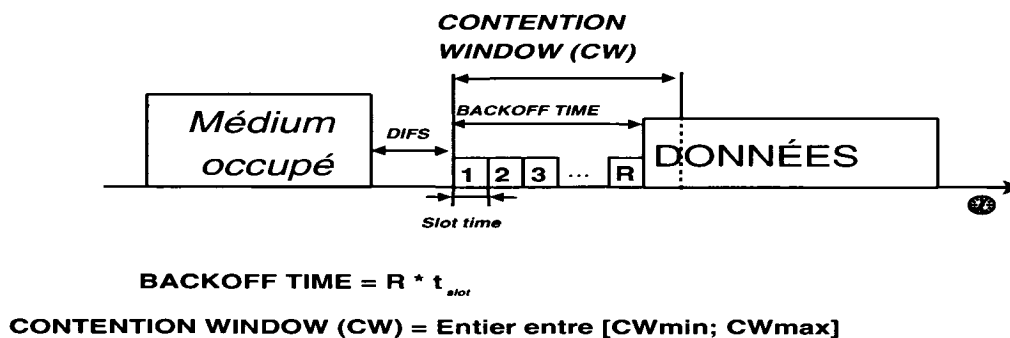


FIG. 1.7 Procédure de « Backoff »

La procédure de contention distribuée commence une fois la valeur aléatoire du compteur du temps de backoff établie pour chacune des stations. Soit R_i la valeur du compteur du backoff de la STA_i et R_k la valeur du compteur de backoff de la STA_k , avec

$R_k < R_i$. La valeur du compteur de chaque station va diminuer de 1, au fur et à mesure que le médium est disponible pendant une période de temps. La valeur R_k atteint 0 et la STA_k commence à transmettre. Les autres stations détectent le changement de l'état du canal (de IDLE vers BUSY) et leur processus de backoff est suspendu. Une fois que le médium est à nouveau disponible pour un temps DIFS, la station i reprend son processus de diminution du compteur de backoff à partir de $R_i - R_k$. Il est possible que deux stations aient le même entier aléatoire et elles commencent la transmission des données en même temps, ce qui provoque une *collision*. Cette transmission incorrecte du paquet est détectée lorsqu'une STA n'a pas reçu d'ACK de la destination dans la période SIFS. Dans ce cas, la valeur de CW est doublée (i.e. $CW_i = CW_{i-1} \times 2$), et ceci jusqu'à ce que cette valeur atteigne son maximum de CW_{max} . Ce dernier correspond au nombre maximum de retransmissions avant que le paquet soit considéré comme perdu. La valeur du CW est réinitialisée à CW_{min} , soit quand la transmission a été réussite, soit quand le nombre maximum de retransmissions est atteint.

Exemple du fonctionnement général du DCF Simple.- Le DCF peut être déployé dans les réseaux IBSS ou dans les réseaux BSS avec infrastructure car il n'a pas besoin d'un contrôle central. Plusieurs étapes et normes d'opération doivent être considérées pour le fonctionnement du DCF simple comme le montre l'exemple de la Figure 1.8.

- **Processus 1** - Si le médium a été disponible pendant une période plus grande que DIFS, la transmission de la STA_1 vers la STA_2 peut s'effectuer immédiatement. C'est le seul cas où les stations peuvent transmettre sans procédure de contention. La STA_2 reçoit le paquet, vérifie sa validité et attend un temps SIFS pour envoyer l'accusé de réception (ACK) vers la STA_1 .
- **Processus 2** - Pour une nouvelle transmission, les STA_1 et STA_3 doivent attendre un temps égal à un temps DIFS plus un temps de backoff calculé localement dans chaque STA ($t_{slot} \times R1$ et $t_{slot} \times R3$ respectivement). Si $R3 < R1$, la STA_3 accède au médium en premier et commence sa transmission vers la STA_2 qui à son tour envoie

une trame ACK. La STA_1 arrête son processus de backoff et attend la disponibilité du médium.

- **Processus 3** - Une fois que le médium est à nouveau disponible, la STA_1 attend une période de DIFS et reprend la diminution de son compteur à partir de la valeur $(R_1 - R_3)$ jusqu'à une valeur de 0 afin de permettre la transmission de ses données.

Fonctionnement du DCF avec la méthode RTS/CTS.- Pour contrôler la présence de noeuds cachés et les taux élevés des collisions, il existe une deuxième méthode d'accès similaire au DCF simple : *le DCF avec RTS/CTS*. Ce deuxième mécanisme utilise des petites trames de contrôle « Request to Send » (RTS) et « Clear To Send » (CTS) de longueur fixe (20 octets et 14 octets respectivement) qui permettent de réserver le médium avant une transmission. Les étapes de la Figure 1.9 sont les suivantes :

- Après l'attente d'un temps DIFS plus le temps du processus de backoff, la STA_1 transmet un paquet RTS pour savoir si la station destination (STA_2) est disponible. La station source est donc en train de communiquer aux autres stations qu'elle veut utiliser le médium. Ces dernières stations configurent leur indicateur NAV avec une valeur de temps totale de $NAV_{t,RTS} = 3 \times SIFS + t_{DATA} + t_{ACK} + t_{CTS}$ où t_{DATA} est le temps pour envoyer une trame de données, t_{ACK} est le temps pour envoyer un acquittement et t_{CTS} est le temps pour envoyer une trame CTS.
- Si la station destination (STA_2) est disponible, elle répond avec un paquet CTS (Clear To Send) après une période de temps SIFS. Dans ce cas, les stations, incluant celle n'ayant pas entendu le RTS, configurent leur indicateur NAV avec la valeur de $NAV_{t,CTS} = 2 \times SIFS + t_{DATA} + t_{ACK}$.
- À la réception du paquet CTS, la STA_1 commence l'envoi de paquets.
- Le processus de transmission de données et le processus de backoff restent les mêmes que pour le mode DCF simple.

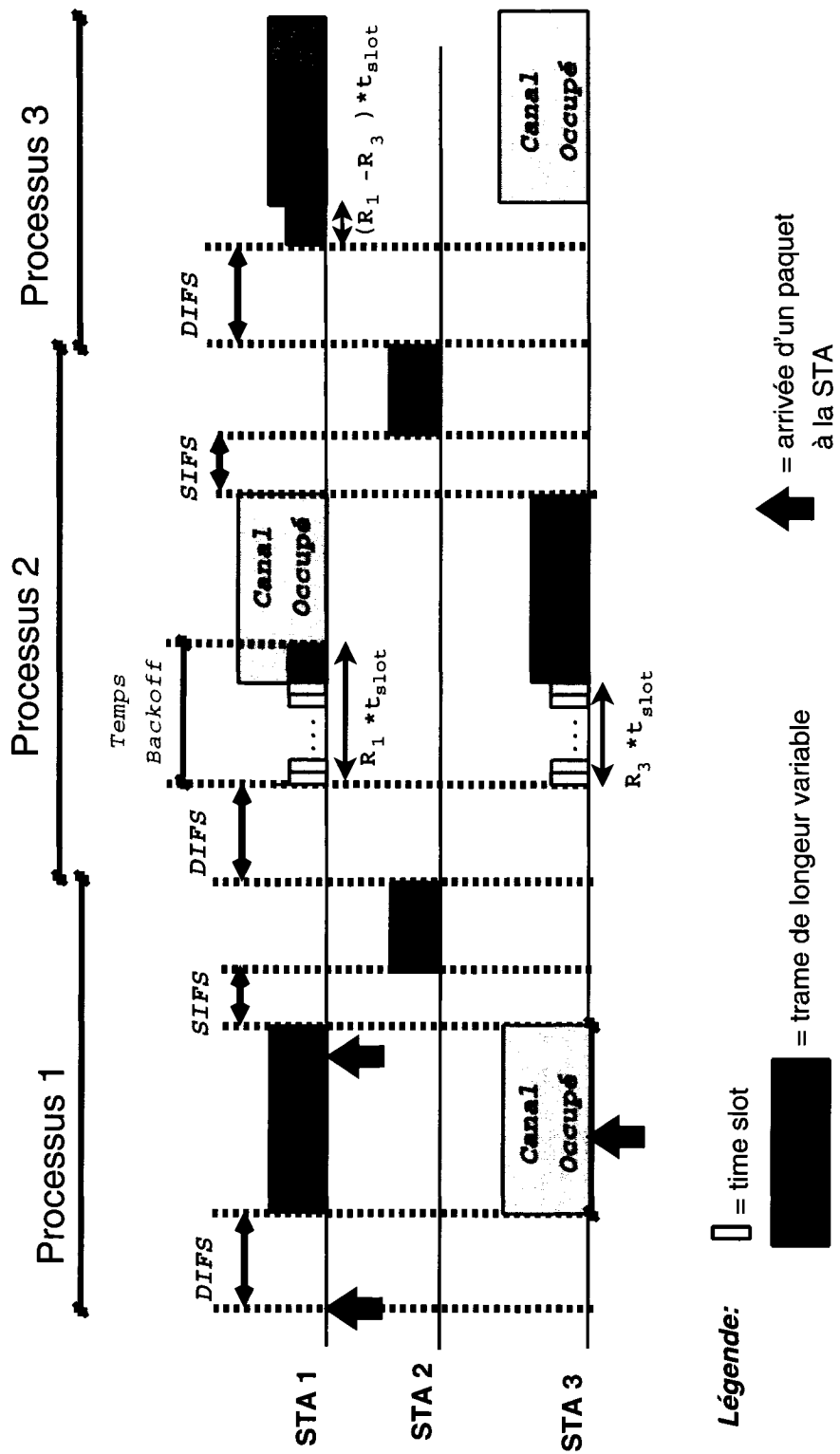


FIG. 1.8 Transmission de données entre trois STA, sans RTS/CTS

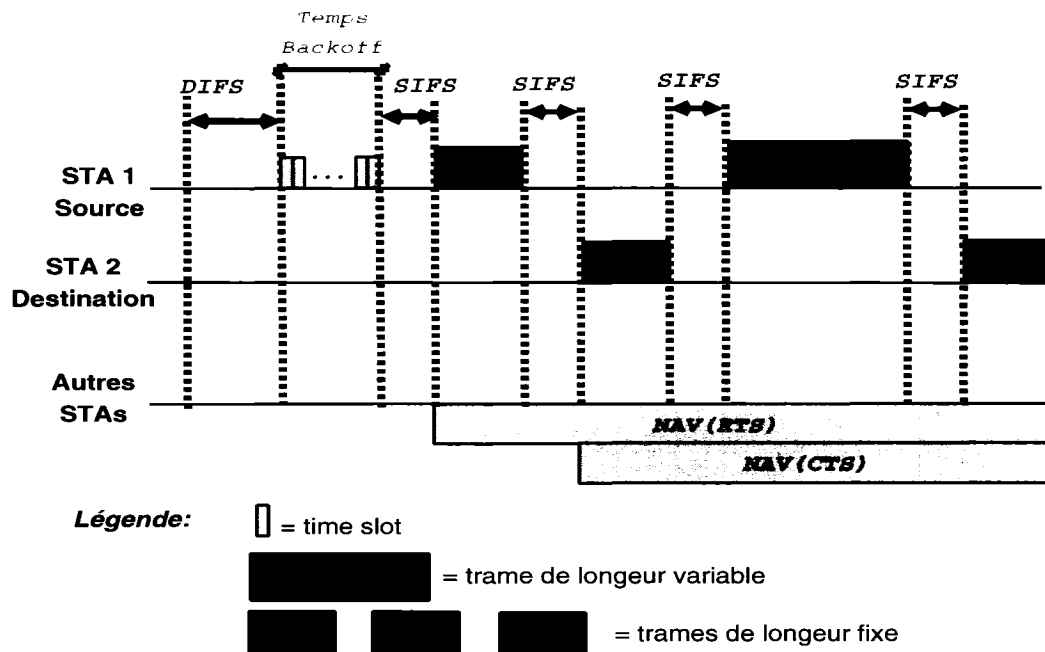


FIG. 1.9 Transmission de données entre trois STA, avec RTS/CTS

À noter que les valeurs temporelles entre les trames SIFS et DIFS ainsi que la taille des paquets de contrôle ACK, RTS et CTS sont fixes et définies par la couche PHY de la norme IEEE 802.11. La longueur du paquet de données et la valeur du compteur de backoff sont des valeurs variables, pouvant changer pour chaque station. D'autre part, le schéma DCF avec RTS/CTS n'est pas toujours utilisé, surtout si la taille des paquets à envoyer est petite ou si le médium n'est pas trop chargé. Dans ces deux cas, le délai additionnel introduit par la transmission des trames RTS et CTS est trop important. Cependant, il s'agit d'un mécanisme efficace qui évite les collisions de paquets longs et le problème de noeuds cachés. Ainsi, la norme [1] établit un seuil minimal pour la taille des paquets à partir de laquelle le mécanisme doit être activé.

1.3.4 Point Coordination Function (PCF)

Le PCF permet d'établir des priorités d'accès aux stations qui doivent attendre leur tour pour transmettre leur données. L'accès au médium se fait alors avec la coordination d'un dispositif central, le « Point Coordinator » (PC). Les APs sont les seuls pouvant être configurés en tant que PC. Par conséquent, cette méthode optionnelle d'accès au médium peut être utilisée uniquement dans les réseaux avec infrastructure. La Figure 1.10 montre que le PCF est un service périodique qui alterne sa mise en place avec celle du DCF à des intervalles réguliers, connus comme *intervalles de répétition sans contention*. La période où le PCF fonctionne est nommée « Contention Free Period » (CFP) et celle d'opération du DCF est nommée le « Contention Period » (CP).

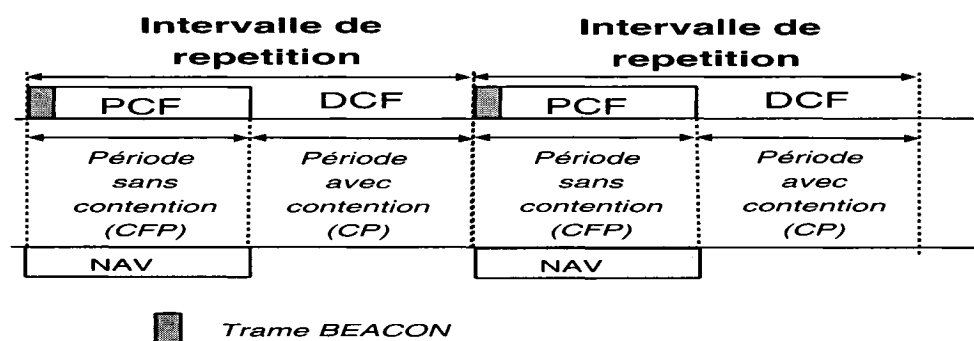


FIG. 1.10 Intervalles de répétition du CFP

Les règles générales à suivre pour cette méthode d'accès sont :

- Le PC attend que le médium soit disponible pour un temps PIFS qui est inférieur au temps DIFS pour envoyer une trame de contrôle : le « BEACON » ou balise. Celui-ci indique le début de la période sans contention et met à jour les indicateurs NAV avec la valeur de la durée de la période sans contention de toutes les stations de la liste d'enquête du PC.
- Les stations communiquent soit avec le PC, soit entre elles directement, en transmettant une seule trame pour chaque autorisation du PC. Dans le cas d'une communica-

tion directe, le PC vérifie à nouveau si le médium est disponible pour une durée de PIFS unités pour récupérer le contrôle des transmissions.

- Le PC envoie aussi une trame de contrôle pour indiquer la fin de la procédure sans contention : le « CF-END ». La durée minimale pour le CFP est équivalente au temps pour envoyer un BEACON, deux trames de données et un CF-END.

Pendant le fonctionnement du PCF, les stations et le PC communiquent de façon ordonnée et centralisée. La norme établit des règles pour ordonner la transmission en permettant un nombre limité de possibilités de réponse pour chaque dispositif. Pour de plus amples renseignements sur le fonctionnement du PCF, le lecteur peut consulter le standard [1], ou plusieurs travaux qui analysent la norme en détail [6] ou [7].

1.3.5 Format des trames MAC

Les trames de la couche MAC des réseaux sans fil 802.11 ont toute une entête provenant de la couche MAC avec les informations de contrôle pour la transmission du paquet, le corps de la trame et finalement la queue pour le contrôle des erreurs. Les formats de ces trames sont expliqués en détail dans l'Annexe I.

1.4 Couche Physique (PHY) 802.11

1.4.1 Généralités de la couche PHY

La couche PHY des réseaux sans fil définit une transmission dans l'infrarouge, mais qui n'est pas très répandue à cause de sa faible portée, et des transmissions sur des canaux radio dans les bandes de 2 à 5 Ghz. Plusieurs possibilités de transmission radio-électrique sont disponibles pour la norme IEEE 802.11 mais toutes utilisent la même architecture.

Celle-ci est divisée en deux sous-couches : la « Physical Layer Convergence Procedure » (PLCP) et la « Physical Medium Dependent » (PMD), tel que montré à la Figure 1.11.

Couche 2	MAC
Couche 1	PLCP ----- PMD

FIG. 1.11 Architecture de la couche PHY

Le PLCP est la sous-couche qui permet l'interaction entre la couche MAC et les transmissions radio en ajoutant un préambule ou une entête aux trames. Ceci permet l'envoi et la réception des données entre plusieurs stations car il s'agit, en fait, de l'interface entre la couche MAC et la couche PHY. Par ailleurs, le PMD définit les caractéristiques et les méthodes de transmission et de réception des bits dans le canal. La norme initiale de la couche PHY a été publiée en 1997, déterminant trois possibilités de codage avec débits de 1 et 2 Mbps, deux techniques radio à étalement de spectre et une technique d'infrarouge diffus. Deux ans plus tard, en 1999, on a normalisé deux nouvelles méthodes de transmission, permettant des vitesses de transmissions plus importantes (802.11a, 802.11b). On assiste ensuite en 2003 à la publication de la norme 802.11g. Le Tableau 1.1 présente les caractéristiques physiques de ces normes connues comme des « normes physiques ». Les normes le plus répandues de nos jours sont le 802.11b et le 802.11g.

L'Annexe II présente plus de détails sur les techniques pour la transmission des données à travers le lien sans fil.

1.4.2 Paramètres importants de la couche PHY

Selon la norme IEEE 802.11, les configurations de la couche PHY sont transparentes pour la couche MAC sauf pour les valeurs temporelles entre les trames (IFS) et pour les

<i>Norme 802.11x</i>	<i>Définition et caractéristiques</i>
Norme 802.11 (1997)	<ul style="list-style-type: none"> ★ FHSS : Étalement de spectre avec sauts de fréquence ★ DSSS : Étalement de spectre en séquence directe ★ IR : Lumière Infrarouge diffuse
802.11a	<ul style="list-style-type: none"> ★ Bande de fréquence : 5 GHz ★ Bande Passante de 20 MHz. ★ Technique OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) ★ Vitesse de transmission jusqu'à 54 Mbps
802.11b	<ul style="list-style-type: none"> ★ Bande de fréquence : 2.4 GHz ★ 3 canaux de bande passante de 22 MHz ★ Technique DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) améliorée ★ Support de débits : 1, 2, 5.5 et 11 Mbps
802.11g	<ul style="list-style-type: none"> ★ Bande de fréquence : 2.4 GHz ★ Bande Passante de 20 MHz ★ Technique OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) ★ Vitesse de transmission jusqu'à 54 Mbps

TAB. 1.1 Caractéristiques des normes 802.11x

valeurs minimales et maximales de la fenêtre de contention du processus de backoff. Ces valeurs, importantes pour notre étude, sont résumées dans le Tableau 1.2. À noter que les normes 802.11b et 802.11g fonctionnent dans la même bande de fréquence.

Paramètres	Valeur conseillée par la norme		
	802.11a	802.11b	802.11g
$t_{slot} (\mu s)$	9	20	9
SIFS (μs)	16	10	10
DIFS (μs) = $2 \times t_{slot} + SIFS$	34	50	28
PLCP et PMD (Bytes)	15	<i>Courte : 15 Longue : 24</i>	15
Vitesse max. (Mbps)	54	11	54
Vitesse min. (Mbps)	6	1	6
$[CW_{min}, CW_{max}]$	[15,1023]	[31,1023]	[15,1023]

TAB. 1.2 Paramètres de la couche PHY

CHAPITRE 2

QUALITÉ DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX WLANS 802.11

2.1 Premières études réalisées sur les WLANS 802.11

La plupart des premiers travaux sur les réseaux WLANS cherchaient à évaluer le comportement et la performance du mécanisme d'accès au médium DCF. Le premier modèle mathématique du fonctionnement du DCF a été proposé par G. Bianchi, [8]. Ce modèle, basé sur les chaînes de Markov, évalue l'efficacité du canal et les pertes en fonction du nombre de stations mobiles existantes. Plus particulièrement, l'auteur souligne la grande dépendance de la performance du mode d'accès DCF de la couche MAC des réseaux 802.11 envers le nombre d'utilisateurs du système et donc envers le pourcentage de collisions entre les paquets. Les paramètres caractéristiques de la couche physique comme la taille de la fenêtre de contention et le temps entre les trames, parmi d'autres, ont aussi une influence importante sur la performance des réseaux sans fil. Une variation de ces paramètres peut permettre l'amélioration de la performance des réseaux WLANS. Par la suite, d'autres recherches ont utilisé ce modèle pour présenter une analyse théorique du débit et du délai moyen subis par un paquet lors d'une transmission [9].

Plus récemment, plusieurs études expérimentales ont été réalisées sur le comportement du débit dans les réseaux sans fil 802.11. S. Garg et al. [10] soulignent l'augmentation du débit en fonction de la taille des paquets. La transmission de grands paquets permet une meilleure performance du système. D'autre part, le débit effectif du canal augmente légèrement en présence d'autres sources et la valeur totale de débit se partage le plus équitablement possible entre toutes les sources présentes dans le réseau pour une même taille de paquets et un même débit de source. Avec ces résultats, on montre que pour

les paquets Ethernet de taille de 1500 Bytes, le débit total effectif est limité à 6 Mbps même si le débit du canal est de 11 Mbps pour un réseau 802.11b. D'ailleurs, Y. Xiao et al. [11] présentent une analyse théorique et expérimentale prouvant que même si le taux de transmission du canal augmente indéfiniment, le débit atteint une valeur maximale et que tout paquet subit une valeur minimale de délai. Les limites dans la performance des réseaux sans fil ainsi que leurs limites supérieure et inférieure du débit et du délai sont dues au surplus du temps de transmission ou « overhead », introduits par le fonctionnement de la couche MAC. La plupart de ces analyses ont été réalisées dans les réseaux saturés, c'est-à-dire où au moins un usager a toujours des paquets à transmettre.

2.2 Capacité des WLANs avec les trafics temps réel

Même si les trafics de données sont majoritaires dans les réseaux sans fil, il existe une demande croissante pour les utiliser avec des services en temps réel comme les trafics de voix et les trafics de vidéo. Dans ce contexte, il est important de savoir non seulement quelle est la performance des WLAN en fonction du débit, mais aussi de trouver quelle est la capacité de ces réseaux à écouler les trafics en temps réel demandant un minimum de Qualité de Service (QoS). H. Zhai et al. [12] montrent que les réseaux saturés ne sont pas l'environnement idéal pour transmettre des trafics en temps réel. Les auteurs évaluent dans ce cas le point optimal de fonctionnement des réseaux WLANs pour transmettre des applications en temps réel. Les comportements du délai, de la gigue et du débit sont étudiés dans ce point optimal. D'autre part, la plupart des premières recherches analysant le nombre maximal de connexions de voix/vidéo supportés par les réseaux 802.11 utilisaient la méthode d'accès au médium PCF. Veeraraghavan et al. [13], présentent une analyse des caractéristiques des trafics de voix en fonction du taux de pertes et du délai. J.-Y. Yeh et al. [14] utilisent des simulations pour évaluer plusieurs variations des schémas de requêtes pour le PCF. A. Köpsel et al. [15] proposent, par contre, des mé-

canismes d'accès hybrides en utilisant DCF et PCF pour améliorer les critères de QoS (délai, gigue et pertes). Par ailleurs, C. Li et al. [16] évaluent la performance du réseau en fonction de la gigue des paquets de voix en présence des trafics de données. Pour le cas de la vidéo, [17] présente l'évaluation du nombre de connexions maximales en fonction du débit et du délai du canal avec le mode d'accès PCF. Mais comme nous l'avons vu, le mode d'accès PCF n'est pas du tout répandu commercialement. Ce manque de popularité est dû aux faibles améliorations de sa performance par rapport à la performance du DCF et à sa faible connectivité avec d'autres systèmes sans fil [18].

De nombreux auteurs cherchent donc à évaluer la performance du DCF avec la VoIP. S. Garg et al. [19] sont les premiers à estimer expérimentalement et théoriquement les limites du nombre de sessions de VoIP supportées par les réseaux sans fil 802.11b et 802.11a. Ce nombre maximum est calculé en fonction du CODEC utilisé et en fonction de l'intervalle entre les paquets VoIP appelé intervalle de paquets. Il est rapporté par exemple que seulement 6 appels bidirectionnels de VoIP peuvent être supportés par un réseau 802.11b en utilisant un CODEC G.711 et un intervalle de paquets de 10 ms. M. Elaoud et al. [20] soutiennent les résultats présentés auparavant en analysant expérimentalement les délais et les pertes dans le système. Les auteurs de cette recherche quantifient aussi les facteurs qui limitent cette capacité en montrant qu'une station passe plus de temps à envoyer les bits d'overhead, provenant des entêtes des protocoles (IP, UDP et MAC) et de l'opération du DCF, que les bits de la trame d'information. L'impact de l'intervalle de paquets sur le nombre maximal de connexions de VoIP est évalué en détail dans [21]. L'étude de D. P. Hole et al. [22] se démarque des études précédentes car les auteurs évaluent le nombre maximal de connexions VoIP en utilisant une métrique subjective de QoS, le « Mean Opinion Score » (MOS), au lieu d'utiliser des métriques de performance du réseau. Dans cette analyse, les auteurs évaluent aussi l'impact des conditions du canal, en introduisant des pertes dans la transmission. Une analyse théorique et expérimentale du nombre des sessions de VoIP en modélisant ces

trafics comme des sources ON-OFF au lieu de sources CBR dans les réseaux 802.11a, 802.11b et 802.11g est présentée par [23]. Dans cette étude, on constate que l'élimination de la transmission des paquets avec des silences permet de doubler la capacité des réseaux en raison du multiplexage des trafics. Finalement, la capacité maximale pour supporter des connexions de VoIP en présence des flots de données est analysée théoriquement dans [24] et expérimentalement dans [25, 26].

Contrairement aux études réalisées sur la VoIP et les réseaux sans fil, les recherches visant l'évaluation de la capacité des réseaux WLANs en termes du nombre maximal de connexions vidéo sont beaucoup plus limitées. M. Shimakawa et al. [27] évaluent ce nombre maximal de connexions supportées par les dispositifs 802.11g. Dans cette recherche, l'effet de la présence de trafic de données (web et ftp) est soulignée. Dans le cas de la vidéo, les recherches mettent l'accent sur l'impact de la transmission à travers un lien sans fil de différents encodages de vidéo. Plus précisément, l'impact de la quantité de pertes, de la taille des paquets transmis et la charge du canal sur la qualité de la vidéo encodée sous un format MPEG est évalué expérimentalement par [28–30]. Ces dernières recherches démontrent que le nombre de rafales d'erreurs devient plus important si la taille des paquets de vidéo est plus petite et que le taux de pertes augmente avec la taille des paquets. Donc, le besoin d'un compromis entre la taille des paquets de vidéo et le taux de pertes dans le lien sans fil devient indispensable. Plusieurs propositions pour une modification du mécanisme d'accès DCF sont suggérées par [31, 32] pour améliorer le délai subi par les paquets vidéo dans les WLANs. Finalement, J.-J. Beaudoin et al. [33] présentent des modifications de la configuration de l'encodage des trafics de vidéo dans le but d'améliorer la qualité de la vidéo quand les conditions de la transmission sont défavorables, comme dans le cas du lien sans fil.

2.3 Besoins de QoS dans les réseaux WLANs 802.11

Les réseaux à commutation de paquets, comme les réseaux WLANs 802.11, ont une meilleure utilisation de la bande passante face aux réseaux à commutation de circuits grâce au multiplexage statistique de tous les trafics dans un seul lien. Cependant, les technologies à commutation de paquets offrent moins de garanties pour la transmission des données. L'utilisation croissante des applications en temps réel avec les réseaux à commutation de paquets exige de plus en plus mécanismes de contrôle qui garantissent la Qualité de Service (QoS) perçue par les usagers. La couche MAC de certains liens sans fil assure cette QoS en termes de différents critères de performance du réseau (débit, délai, gigue, pertes) afin d'éviter les dégradations de la qualité des applications. Malgré cela, la QoS est souvent limitée dans les réseaux sans fil où les stations sont mobiles et le taux d'erreur du lien est très important [34–36]. Comme on l'a vu dans la Section 1.3.4, le PCF est le mécanisme d'accès au médium recommandé par le standard 802.11 pour les services ayant des contraintes de QoS. Le PCF est basé sur une requête réalisée à chaque station pour permettre une transmission de paquets sans collisions. Ce mécanisme permet la diminution des collisions et des pertes dans le canal mais aucune priorité entre les classes de trafics n'est effectuée. De plus, on perçoit des pertes en largeur de bande pour chaque autorisation de transmission inutiles, lorsque toutes les stations n'ont pas toujours des paquets à envoyer. D'autre part, le mode d'accès DCF est conçu comme un mécanisme de meilleur effort où les trafics de voix et de vidéo doivent être en concurrence avec les trafics de données sans aucune priorité de service.

2.4 La norme IEEE 802.11e

Plusieurs techniques comme la différenciation de services et certaines modifications du mode d'accès ont été proposées pour améliorer la performance des réseaux sans fil

802.11 en présence d'applications temps réel. Les différents schémas proposés sont récapitulés dans [35, 37]. Notre étude porte surtout sur la norme 802.11e [38] visant à améliorer la QoS de la couche MAC avec la différenciation de services. Elle propose un nouveau mécanisme d'accès, nommé « Hybrid Coordination Function » (HCF). Le HCF est composé de deux méthodes d'accès, comme pour la couche MAC 802.11 originale. La première est la modification du mécanisme d'accès sans contention : « Enhanced Distributed Channel Access » (EDCA) et la deuxième est la modification du mécanisme centralisé le « HCF Controlled Channel Access » (HCCA). Les travaux dans ce mémoire sont basés sur les modifications les plus récentes apportées au mode d'accès avec contention (EDCA).

Sous le mécanisme EDCA, les paquets qui arrivent à la couche MAC d'une station avec priorité, nommée QSTA, sont classifiés sous 4 priorités d'accès, connues sous le nom de *catégories d'accès* (AC), et qui dépendent des quatre classes de trafic suivants : trafic de background (AC_BK), trafic meilleur effort (AC_BE), trafic de vidéo (AC_VI) et trafic de voix (AC_VO). Ces 4 ACs supportent les 8 priorités d'utilisateurs définies auparavant pour les réseaux câblés selon la norme IEEE 802.1d. Chacune de ces ACs a sa propre file d'attente, son propre intervalle de temps entre les trames, connu sous le nom de « Arbitration IFS » (AIFS[AC]) ainsi que ses propres valeurs limites de la fenêtre de contention $CW_{min}[AC]$ et $CW_{max}[AC]$. L'assignation de différentes valeurs pour ces paramètres dans le mécanisme d'accès au médium permet la différenciation de services en donnant priorité aux ACs en fonction de leurs paramètres de contention. La valeur de l'AIFS[AC] est calculé à l'aide de l'Équation 2.1 où un « arbitration inter space number » (AIFSN[AC]) est assigné à chaque AC. Pour maintenir une compatibilité avec le DCF, la valeur de AIFS[AC] doit être au moins égale à un DIFS, c'est-à-dire que AIFSN[AC] est au moins égal à 2.

$$AIFS[AC] = SIFS + AIFSN[AC] * t_{slot} \quad (2.1)$$

La procédure de backoff pour chacune des files d'attente du EDCA est la même que pour le DCF. Cependant, dans les EDCA, les « backoff counters » des différentes ACs peuvent arriver à 0 au même moment provoquant ainsi une *collision virtuelle* dans un noeud. Ce problème est résolu par un gestionnaire interne qui donne l'accès au médium à l'AC de plus haute priorité. La Figure 2.1 montre le fonctionnement de ce mécanisme d'accès au médium. Le Tableau 2.1 présente les paramètres suggérés par le standard pour chaque AC. À noter que les paramètres CW_{min} et CW_{max} utilisés pour calculer les fenêtres de contention de chaque AC dépendent de la norme physique utilisée : 802.11b ou 802.11g. La norme propose aussi une amélioration optionnelle du mécanisme d'accès : l'utilisation d'un intervalle de temps, nommé le « Transmission Opportunity » (TxOP), pour permettre à une QSTA ou au point d'accès, nommé QAP, d'envoyer des rafales de paquets sans processus de backoff tandis que le reste des QSTA attendent. Il s'agit d'un mécanisme de réservation du médium.

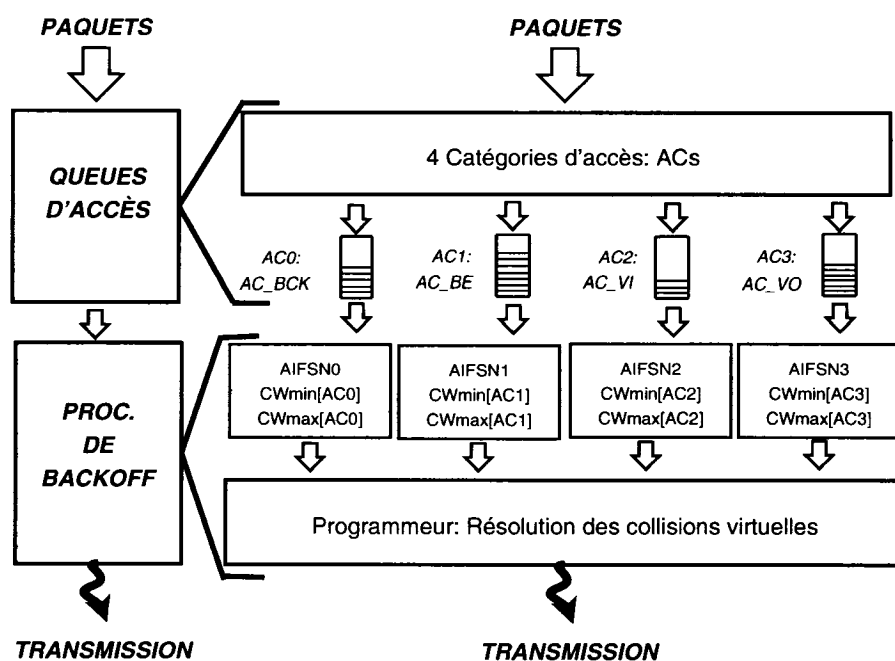


FIG. 2.1 Fonctionnement du mécanisme EDCA

AC	AIFSN	$CW_{min}[AC]$	$CW_{max}[AC]$
AC_VO	2	$(CW_{min} + 1)/4 - 1$	$(CW_{min} + 1)/2 - 1$
AC_VI	2	$(CW_{min} + 1)/2 - 1$	CW_{min}
AC_BE	3	CW_{min}	CW_{max}
AC_BCK	7	CW_{min}	CW_{max}

TAB. 2.1 Paramètres pour chaque AC de la norme 802.11e

Plusieurs analyses et études ont été réalisées sur cette nouvelle proposition. Par exemple, [39] présente une analyse détaillée du fonctionnement du EDCA pour évaluer quel est l'impact de chacune des modifications réalisées sur la performance du système sans fil. Dans [40], les auteurs utilisent les différentes priorités établies par la norme pour augmenter l'équité entre les QSTA et le QAP en donnant une haute priorité d'accès au QAP qui doit transmettre plus de trafic. J. W. Tantra et al. [41] présentent des modèles théoriques sur la performance du débit et du délai du EDCA basés sur le premier modèle théorique du DCF de Bianchi [8]. D'autre part, [34, 42, 43] présentent des analyses expérimentales dans le but de montrer que la performance du nouveau protocole EDCA en termes de délai, débit et pertes est nettement meilleure que celle du DCF, surtout pour les applications à haute priorité. Ces évaluations étudient les réseaux en présence des quatre classes de trafic présentées dans le Tableau 2.1. Finalement, le nombre de connexions de VoIP maximales supportées par un système EDCA/HCCA est analysé dans [44] tandis que le nombre de connexions de vidéo en fonction du nombre de connexions de VoIP est présenté dans [45]. Cette analyse expérimentale utilise plusieurs critères de QoS comme le délai, la gigue, le taux de pertes et le taux d'erreurs pour évaluer le nombre de connexions admises. Les auteurs montrent aussi l'impact des améliorations apportées par la norme IEEE 802.11e en présence des multiples classes de trafics (voix, video, data).

2.5 Mécanismes de Contrôle d'Admission

De nombreux travaux de recherches ont tenté de déterminer le nombre maximal de connexions de VoIP/vidéo supportées par un réseau sans fil 802.11 (Section 2.2). Ils montrent qu'il existe un point critique à partir duquel le réseau atteint la saturation. Ceci se traduit par une importante dégradation des valeurs de QoS (délai, gigue et pertes) de toutes les connexions actives dans le réseau. On retrouve le même problème avec la nouvelle norme IEEE 802.11e : la QoS des connexions actives n'est pas garantie quand la charge dans le système est importante [46, 47]. Un schéma de *Contrôle d'Admission de Connexions* (CAC) doit donc être mis en place pour accepter une nouvelle connexion et lui offrir les garanties de performance requises, sans affecter la QoS des applications actives.

Une des premières propositions de mécanismes de CAC pour les réseaux 802.11 est présentée dans [48]. Les auteurs utilisent une nouvelle mesure pour caractériser l'utilisation des ressources par un flot qui est nommé le « channel utilization estimate » (CUE). Le CUE représente la fraction de temps total nécessaire, incluant le temps de surplus, pour transmettre un flot à travers le réseau sans fil. Cette valeur de CUE est calculée en multipliant le nombre de paquets par seconde qu'une source veut transmettre par le temps moyen de transmission d'un paquet, soit le temps de transmission des données du paquet plus le temps d'overhead. De plus, les auteurs démontrent que la somme des CUEs des différents flots qui occupent le réseau, le « CUEtot », indique la portion de temps pendant laquelle le canal est occupé transmettant tous les flots. Le « CUEtot » prend des valeurs comprises entre 0 et 1 et les ressources disponibles dans le réseau sont équivalentes à « 1-CUEtot ». Pour la mise en place du CAC basé sur le CUE, les auteurs suggèrent de simplifier le calcul du CUE de chaque flot en estimant le taux de transmission d'une source ainsi que la valeur de backoff utilisée par chaque station.

D'autre part, [49] propose aussi une nouvelle mesure pour réaliser le CAC dans les réseaux 802.11 : le « channel busyness ratio » qui est le ratio entre le temps d'occupation du canal par les transmissions réussies et les collisions, et le temps total. Pour réaliser le mécanisme de CAC, les auteurs présentent une analyse théorique de la valeur du « channel busyness ratio » en fonction de l'état du temps de backoff de chaque station. Cela équivaut à dire qu'il dépend de la probabilité de n'avoir aucune transmission, de la probabilité d'avoir une transmission avec succès et de la probabilité d'avoir une collision. Pour le rejet/acceptation des nouvelles connexions, ce modèle mathématique de CAC se base sur le principe de maintien du réseau sans fil à son point optimal d'opération où le « channel busyness ratio » est égal à 0.95. Cette valeur, où le délai, la gigue et le débit sont suffisamment petits pour ne pas dépasser les contraintes de QoS des applications en temps réel, a été obtenue par différents tests expérimentaux réalisés par les auteurs. De plus, H. Zhai et al. proposent un mécanisme qui règle l'utilisation des ressources par les trafics de meilleur effort pour éviter d'influencer les critères de QoS des trafics en temps réel.

D'autres propositions théoriques pour réaliser du CAC [50, 51] utilisent le premier modèle analytique sur le débit effectif du canal réalisés par G. Bianchi [8]. Dans la première étude [50], les auteurs présentent une généralisation de la valeur de ce débit effectif pour N classes de trafic différentes. Dans ce contexte, le débit effectif total du canal est égal à la somme des débits effectifs de toutes les STAs et de toutes les classes de trafic. Ce débit effectif total représente l'état du réseau. Il s'agit donc d'une mesure indiquant la disponibilité des ressources pour des nouvelles connexions. D'autre part, les besoins de QoS de chaque connexion de différentes classes de trafic sont mesurées en termes du taux de bits par seconde, la charge, qui doit être garanti tout au long de la connexion. Cependant, aucune mesure de QoS en termes de délai, gigue et pertes n'est présentée. Un aspect intéressant de cette approche est qu'elle différencie la charge en mode ascendant de celle en mode descendant permettant ainsi une priorité d'accès supérieure à l'AP qui

est toujours plus chargé car il doit transmettre tous les flots en mode descendant. D'autre part, la deuxième proposition analytique [51] modifie les expressions de débit effectif obtenues par Bianchi pour évaluer le débit effectif du canal quand le système travaille en non-saturation. Ces nouvelles analyses permettent aux auteurs d'avoir une mesure des ressources disponibles dans le réseau équivalente à la bande passante résiduelle entre un système qui se trouve en saturation et un système qui travaille en non-saturation.

Tel que mentionné auparavant, la norme 802.11e vise la QoS des réseaux sans fil avec la différenciation des services. Cependant, cette norme ne propose aucune modification pour garantir que les critères de QoS ne soient pas dépassés si le système se trouve en saturation. Pour cette raison, les recherches sur des mécanismes de CAC pour les réseaux sans fil 802.11e sont plus complètes que celles trouvées dans les réseaux 802.11b/g de base. Les documents [52, 53] récapitulent les différentes propositions des mécanismes de CAC pour le 802.11e trouvées dans la littérature.

Le mécanisme de CAC présenté dans [48] est facile à mettre en oeuvre mais il faut mesurer périodiquement le temps moyen de backoff et le taux moyen de transmission de chaque source pour calculer le « CUEtot » du système. De plus, la valeur du CUE d'un flot ayant des caractéristiques qui changent au cours du temps, comme le cas de données, ne peut pas être estimé à l'avance. En d'autres termes, ce modèle ne s'applique pas pour ces types de flots. Dans [49], on retrouve un modèle de CAC beaucoup plus compliqué qui calcule tout le temps les probabilités de disponibilité du médium. De plus, les auteurs présentent un modèle qui se base sur le fonctionnement de la couche MAC et non pas des classes des trafics et de ses restrictions de QoS. D'autre part, le modèle présenté dans [50] devient compliqué à mettre en oeuvre car le mécanisme de CAC a besoin de plusieurs informations (plus de 8 vecteurs d'informations) pour calculer la disponibilité des ressources dans le canal. Tous ces propositions de CAC évitent la saturation du système mais n'utilisent aucune de mesures de QoS (délai, gigue, et pertes) pour évaluer leur modèle et assurer la satisfaction des usagers des applications temps

réel. Finalement, la plupart des propositions de CAC pour les réseaux 802.11e présentent des modifications du mécanisme d'accès EDCA ou introduisent des dispositifs externes pour réaliser le CAC.

Notre étude présente une approche simple et facile de réaliser du CAC dans les réseaux sans fil 802.11 en utilisant la notion de *Bande Passante Effective* d'une connexion. Cette approche permet d'établir une mesure des ressources utilisées par chaque classe de trafic en fonction de leur besoins en termes des critères de QoS, de ressources encore disponibles dans le système et du mode d'opération de la couche MAC. Les techniques de la BPE pour le CAC ont été très étudiées dans les réseaux ATM [3, 54–57], dans les réseaux IP à large bande [2, 58] ainsi que dans les réseaux sans fil pour les cellulaires CDMA [59]. Cependant cette approche n'a pas été analysée dans la littérature précédente pour réaliser un CAC dans les réseaux sans fil 802.11.

CHAPITRE 3

LES CLASSES DE TRAFIC

Le premier objectif de notre étude expérimentale est d'évaluer par simulation la performance des réseaux WLANs 802.11b/g en présence de trafics qui ont des besoins stricts de *Qualité de Service* (QoS). La performance est évaluée en fonction du nombre de connexions admises par classe de trafic tout en garantissant leur QoS respective. Dans ce contexte, ce chapitre présente les caractéristiques de chaque classe de trafic utilisée dans notre étude (Section 3.1) ainsi que leurs critères de QoS (Section 3.2).

3.1 Trafics utilisés dans l'étude

3.1.1 Le trafic de Voix sur un réseau IP

La Voix sur IP (VoIP), aussi connue comme téléphonie IP, est une nouvelle technologie qui permet de transmettre la voix sur les réseaux à commutation par paquets à l'aide du protocole IP. Les paquets de voix, qui sont à l'origine des signaux analogiques, sont tout d'abord transformés en paquets de données numériques. Les données peuvent aussi être compressées pour obtenir une meilleure utilisation de la bande passante du réseau. Une fois les données compressées en paquets, le transport de la voix sur le réseau utilise une pile de protocoles tels que RTP, UDP et IP. Plus d'informations sur l'évolution de la téléphonie traditionnelle vers la téléphonie IP sont décrites dans [60] ainsi qu'une description détaillée des différents protocoles et architectures utilisés par les communications VoIP sont également disponibles dans [61].

Pour les simulations de cette étude, les trafics de VoIP sont modélisés par une source exponentielle ON/OFF avec des périodes d'activité exponentiellement distribuées de longueur moyenne de 400 ms et des périodes de silence exponentiellement distribuées de longueur moyenne 600 ms. Pendant les périodes d'activité, des paquets de longueur fixe sont générés à des intervalles de temps constants qui dépendront du CODEC utilisé. Le protocole RTP n'est pas simulé pour éliminer son influence sur la performance des flots de VoIP. Ceci nous permet de se concentrer sur l'analyse de la performance de la couche MAC des WLANs.

Les CODECs VoIP.- Tel que mentionné auparavant, les CODECs, du nom anglais « coder-decoder compression schemes », sont des matériaux ou logiciels qui transforment les trafics analogiques de voix ou vidéo en données numériques et inversement. Ces éléments, standardisés par les recommandations de l'**Union Internationale de Télécommunications** (ITU), déterminent les ressources nécessaires en bande passante pour une transmission de voix sur le réseau et ont la capacité de compresser ces données en modifiant légèrement le signal original. Une compression plus importante permet de diminuer la quantité de bande passante nécessaire, mais cela peut provoquer une diminution importante de la qualité de la communication perçue par les usagers. Le CODEC qui se rapproche le plus de la qualité du téléphone classique est le CODEC G.711. Celui-ci a le même taux de transmission de 64 kbps que la voix sans compression. D'autre part, le CODEC le plus populaire est le CODEC G.729 qui possède un facteur de compression de 8 et donc un taux de 8 Kbps tout en ayant une faible dégradation de la qualité.

Les CODECs émettent un paquet à chaque intervalle de paquetisation ou d'échantillonnage (10 ms, 20 ms, 30 ms, etc.) tel que montré à la Figure 3.1. La taille de chaque paquet transmis par le CODEC (L_{pq}) dans le réseau est calculée à partir du taux de transmission du CODEC (D_{cod}) et de l'intervalle de paquetisation (t_{int}) :

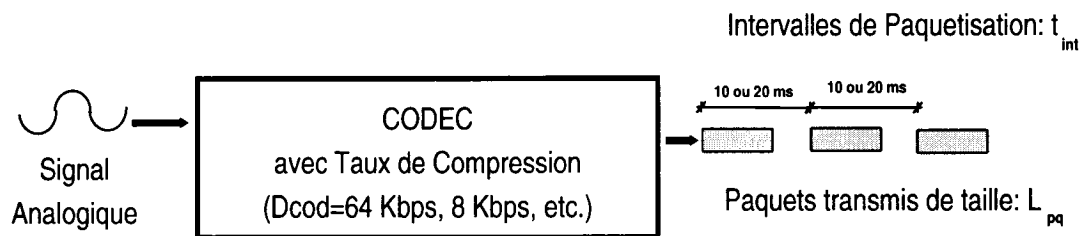


FIG. 3.1 Fonctionnement des CODECs VoIP

$$t_{int} = \frac{L_{pq}}{D_{cod}} \quad (3.1)$$

À titre d'exemple, avec le CODEC G.711 (i.e. taux de 64 kbps) et un temps d'échantillonnage de 10 ms, les paquets à la sortie de l'encodeur ont une taille égale à 80 Bytes. Dans ce projet, on évalue la performance des CODECs G.711 et G.729 dans les réseaux WLAN. Pour chaque CODEC, l'analyse portera sur des intervalles de paquetisation de 10 et 20 ms. Le Tableau 3.1 présente les valeurs caractéristiques de débit et de taille paquet de chaque CODEC utilisé dans les simulations ainsi que le nombre de paquets par seconde ($1/t_{int}$) qui sont transmis par le CODEC, aussi appelé taux d'envoi.

CODEC	Débit CODEC (Kbps)	Intervalle (ms)	Taille paquets (Bytes)	Taux d'envoi (Paquets/sec)
G.711	64 kbps	10	80	100
		20	160	50
G.729	8 kbps	10	10	100
		20	20	50

TAB. 3.1 Paramètres des CODECs utilisés dans les simulations

Certains CODECs supportent également la suppression de silences, où les silences ne sont ni codés ni transmis. Cela élimine la transmission des paquets sans aucune information évitant ainsi la perte inutile de bande passante. Le modèle ON/OFF des trafics de VoIP, utilisé par les simulations de cette étude, modélise un CODEC qui possède la

caractéristique de suppression des silences en n’envoyant pas des paquets pendant les silences (périodes OFF).

3.1.2 Le trafic vidéo

Comme le trafic de VoIP, le trafic vidéo analogique est transformé et compressé en paquets numériques pour les transmettre à travers le réseau. Pour cette étude, le trafic vidéo utilise l’encodage proposé par le « *Moving Picture Experts Group* » (MPEG) de la norme ISO/IEC MPEG-4, nommée formellement ISO/IEC 14496. Contrairement aux normes MPEG précédentes, l’encodage MPEG-4 compresse la vidéo plus efficacement grâce à un taux d’encodage plus élevé en facilitant sa transmission à travers l’Internet ou les réseaux sans fil. Cet encodage, connu comme *codage orienté à objets*, traite une scène de vidéo comme l’union d’un groupe de petits Objets Vidéo (VO) indépendants. Ainsi, chaque VO est composé par une séquence de trois types de trames connues comme les « Video Object Planes » (VOP) avec les caractéristiques suivantes :

- **Les trames I (*Intra-coded frames*)** : sont générées à partir de l’information contenue dans une image.
- **Les trames P (*Predictive-coded frames*)** : sont codées à partir de l’information des trames I ou P précédentes.
- **Les trames B (*Bidirectional-Predictive-coded frames*)** : sont codées à partir de l’information des trames I et P précédentes et suivantes.

Les trames I sont les plus grosses trames de la séquence MPEG-4. Ces trames sont très importantes pour l’encodage et le décodage des flots vidéo car elles possèdent toute l’information de l’image. De plus, elles permettent l’encodage des autres trames P et B. Pour la transmission d’un vidéo MPEG-4, les trames I, P et B sont placées suivant une succession spécifique et périodique connue sous le nom de « Group of Pictures » (GOP). Dans cette recherche, la trace MPEG-4 utilisée dans les simulations est un encodage de haute

qualité du film « The Firm » disponible dans [62]. Le GOP de cette trace vidéo est composé par une séquence périodique de 12 trames selon l'ordre suivant : IBBPBBPBBPBB. La trace vidéo de ce film est un fichier à plusieurs colonnes qui indique au simulateur l'instant auquel la trame vidéo doit être envoyée, ainsi que sa taille. Dans cette trace, on constate que les trames vidéo, de taille variable, sont envoyées à des intervalles constants de 40 ms. La Figure 3.2 présente un échantillon de cette trace vidéo (i.e 5 GOP) où les points représentent les trames générées par la source.

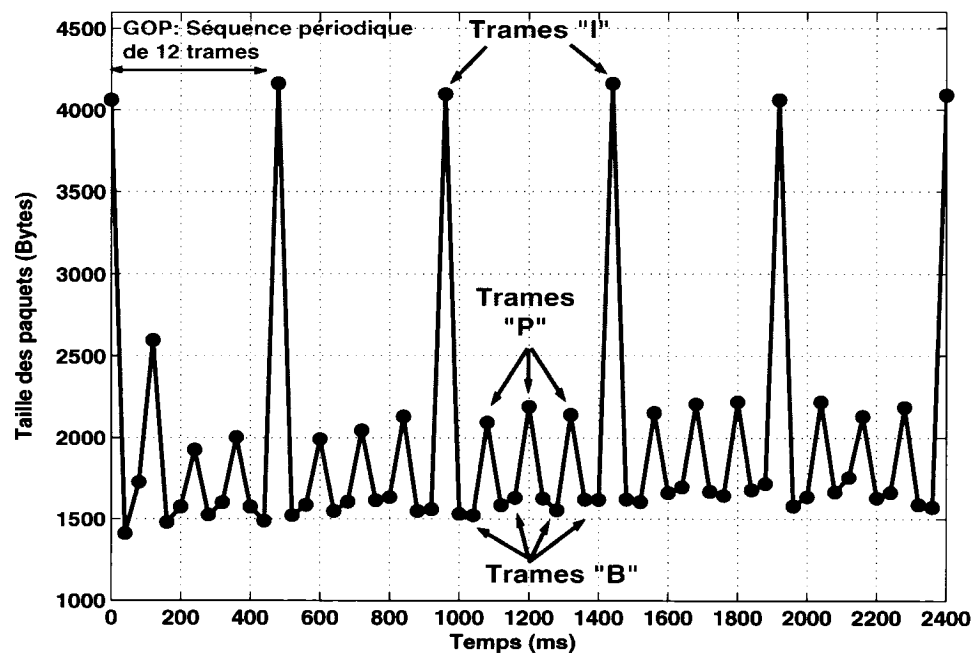


FIG. 3.2 Échantillon de la trace vidéo

Les principales statistiques comme la taille moyenne des paquets, la variance des tailles, le débit moyen et le débit maximale de la source de la trace vidéo du film « The Firm » déjà analysées dans [63] sont résumées dans le Tableau 3.2.

Il est aussi intéressant d'évaluer la distribution des tailles de la trace vidéo utilisée dans cette étude. La Figure 3.3 montre l'histogramme représentant la distribution des tailles de paquets vidéo dans la trace.

FILM	Taille des paquets		Débit de la source	
	Moyenne	Variance	Moyen	Maximum
The Firm	1.5 Kbytes	0.75	0.31 Mb/s	2.1 Mb/s

TAB. 3.2 Statistiques de la trace vidéo MPEG-4 utilisée

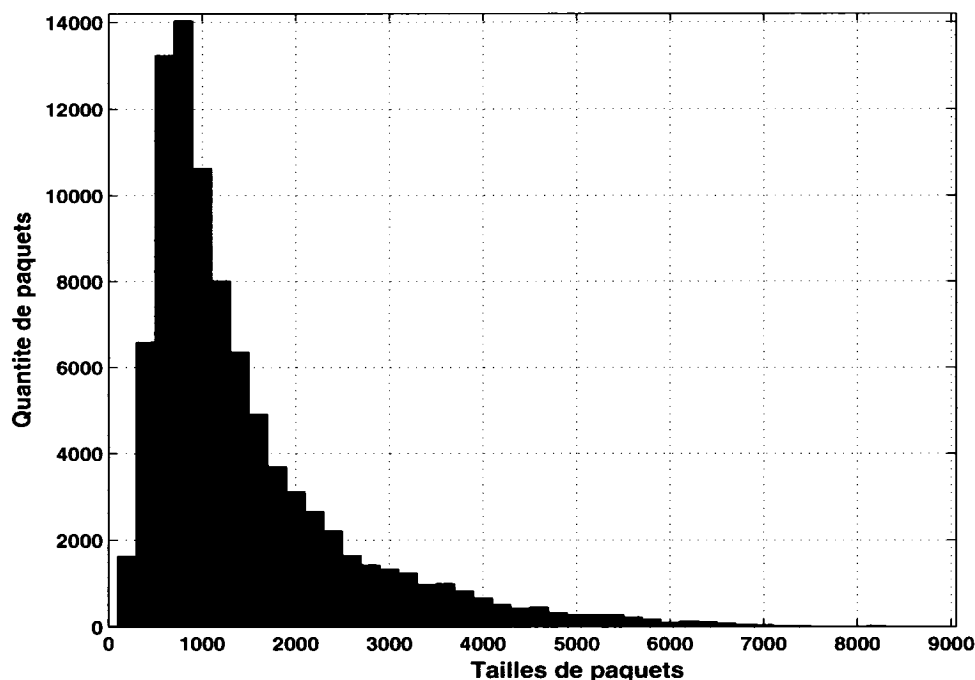


FIG. 3.3 Distribution des tailles de paquets vidéo

3.1.3 Le trafic de données CBR

Dans les études expérimentales, plusieurs modèles sont possibles pour le trafic de données. [64] montre une évaluation de la performance des réseaux WLAN en utilisant plusieurs modélisations de flots de données : poissonnien, exponentiel, etc. L'étude dans ce mémoire utilisera des sources constantes « Constant Bit Rate » (CBR) pour simuler les sources de données.

Sources CBR.- L'impact des flots constants sur la capacité des réseaux WLAN à servir des sources de VoIP et de vidéo est évalué pour plusieurs paramètres des sources CBR :

différentes tailles de paquets de 100, 500, 1024 et 1440 Bytes et différents taux de transmission de chaque source de 128, 512 Kbps, 1, 2 et 4 Mbps. Ces paramètres affectent directement le taux d'arrivée de paquets de la source.

3.1.4 Le protocole de transport utilisé dans les simulations

Le choix du protocole de transport pour les simulations est expliqué en fonction de ses caractéristiques d'opération.

Caractéristiques du protocole TCP.- Le protocole « Transmission Control Protocol » est un protocole de transport orienté connexion. En effet, il doit établir une connexion pour contrôler l'état de la transmission, avant même de communiquer. Il a été créé dans le but de donner de la fiabilité à la communication, indépendamment des couches inférieures. La fiabilité de TCP est basée sur l'utilisation d'accusés de réception, de numéros de séquences et de numéros d'accusés de réception pour chaque paquet transmis. La fiabilité dans les réseaux est un aspect fondamental pour des applications telles que des données mais le délai additionnel provoqué par ce protocole est un désavantage pour les applications en temps réel. Le délai additionnel est dû à la longueur de l'entête, à la transmission d'acquittements, à la retransmission des paquets erronés et perdus, et au contrôle de flot et de congestion.

Caractéristiques du trafic UDP.- Le protocole de transport « User Datagram Protocol » a la caractéristique d'être un protocole non orienté vers la connexion. Il débute l'envoi des paquets sans tenir compte de l'état de la connexion. Ce protocole est donc très rapide mais très peu fiable car il n'envoie pas d'acquittements. Pour répondre aux besoins importants de la vitesse de transmission et de réponse immédiate des applications en temps réel de voix et vidéo, ce projet de recherche utilise UDP comme protocole de transport dans les simulations.

3.2 Mesures de Performance

3.2.1 La Qualité de Service dans le réseau

L'UIT définit la **Qualité de Service** (QoS) comme l'ensemble des effets et des performances de service qui déterminent le degré de satisfaction de l'utilisateur et la perception du service qui lui est offert. L'analyse de la QoS perçue par les utilisateurs peut être contrôlée par l'évaluation de la performance d'un réseau ou d'un système qui est déterminée par l'ensemble des paramètres échangés pendant une communication : délai, pertes, bande passante, gigue, écho, etc. Il faut respecter certaines limites afin d'offrir une bonne QoS dans une communication entre les utilisateurs. Tous ces critères de qualité qui définissent la performance d'un réseau peuvent être mesurés de deux manières différentes :

- de façon unidirectionnelle, c'est-à-dire d'une source vers une destination ;
- de façon bidirectionnelle, c'est-à-dire l'aller et le retour entre la source et la destination.

Pour les simulations de cette étude, des liens asymétriques sont considérés : des mesures unidirectionnelles des critères de performances sont donc utilisées. Les valeurs numériques de ces critères sont établies par les recommandations des organismes internationaux de normalisation.

3.2.2 Les organismes de standardisation

Les organismes de standardisation sont des organismes reconnus au niveau national ou international. Leurs activités principales portent sur le développement, la coordination, la promulgation, la révision, la modification, la réédition, l'interprétation et le maintien de normes. Les critères de Qualité de Service des réseaux de télécommunications sont principalement établis par l'IETF (*Internet Engineering Task Force*), l'IEEE (*Institute of*

Electrical and Electronics Engineers), l'UIT (*Union Internationale de Télécommunications*) et l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Les recommandations de l'UIT et de l'IETF utilisées par cette étude sont décrites en détail.

3.2.3 Les critères de QoS

Notre étude cible trois critères parmi tous les critères de performance existants : le *délai moyen*, la *gigue moyenne* et le *taux de pertes*. La définition de ces termes ainsi que les limites recommandées pour obtenir une bonne QoS dans une communication temps réel sont expliquées dans cette section.

3.2.3.1 Le Délai

Le délai bout à bout (« E2E delay ») est défini comme le temps moyen requis pour transmettre un paquet de la source jusqu'à la destination. Les composantes qui influencent ce délai de bout à bout sont : le délai de paquetisation, de transmission et propagation dans les liens, le délai d'attente dans les files d'attente du réseau ainsi que celui des dispositifs d'entrée et de sortie [65].

Limite de délai pour la VoIP.- La limite du délai bout à bout pour une *bonne communication* de VoIP définie par la ITU-T G.114 [66] varie entre les 150 ms et les 200 ms. Mais certains fournisseurs d'équipements, comme Avaya [67] suggèrent d'utiliser une valeur maximale qui varie entre 80 et 100 ms pour le délai du réseau uniquement dans un système de VoIP. Cette suggestion est faite pour obtenir une communication de voix meilleure que le téléphone cellulaire, en tenant compte que la compression et la paquetisation de la voix peuvent prendre un temps supérieur à 75 ms.

Limite de délai pour la vidéo.- La vidéo est la deuxième application sensible aux délais utilisée dans cette étude. Plusieurs travaux précédents montrent que les limites de délai ne doivent pas dépasser les 150 ms pour une bonne communication de vidéo déjà encodé (H323 ou MPEG-4) [68,69]. Cependant, les flots de vidéo peuvent tolérer une valeur plus importante de délai que les flots de VoIP.

Limite de délai pour les données.- Pour éviter des situations où les réseaux deviennent très surchargés et le système devient instable, on a établi une limite de délai de 2000 ms pour les paquets de données. Ce seuil a été fixé en réalisant plusieurs analyses dans les premiers résultats de simulations où on a constaté que la valeur moyenne du délai de paquets de données ne dépasse pas les 100 ms dans les systèmes stables et augmente exponentiellement quand le réseau est surchargé.

Valeurs limites de délai pour les simulations.- Dans notre étude, on utilisera les seuils reportés dans le Tableau 3.3 comme valeurs limites de délai dans le réseau sans fil. Pour les limites des applications en temps réel, les limites de délai ont été établies en considérant les délais du codage/décodage et en considérant que les paquets vont traverser au minimum un autre réseau (cablé ou sans fil), avec ses propres délais, avant d'atteindre la destination.

	Voix	Vidéo	Données
DÉLAI	75 ms (Bonne Qualité)	100 ms (Bonne Qualité)	2 s

TAB. 3.3 Valeurs maximales des délai utilisées dans l'étude

3.2.3.2 La gigue

La gigue est définie comme la variation entre le délai de bout à bout de deux paquets consécutifs. Plusieurs facteurs comme la congestion, la retransmission des paquets, les

délais du fonctionnement de la couche MAC dans les WLANs, entre autres, font varier cette valeur. La gigue peut provoquer des problèmes similaires à un délai élevé. Il est donc recommandable de maintenir la gigue à des niveaux très faibles et d'utiliser des *tampons* pour ordonner les paquets en éliminant la variation entre les délais. Dans la littérature, les deux organismes de standardization, l'UIT et l'IETF, définissent la gigue avec deux approches différentes.

Définition de l'UIT-T : Les recommandations Y.1540 et Y.1541 de l'UIT-T définissent la gigue G_n du n^e paquet comme la différence entre le délai D_n du n^e paquet et la valeur minimale du délai δ de tous les paquets arrivés dans la communication. Elle s'exprime par la formule 3.2 :

$$G_n = D_n - \delta \quad (3.2)$$

Définition de l'IETF : Les recommandations RFC 2679 et RFC 3393 de l'IETF définissent la gigue G_n du n^e paquet comme la différence entre le délai D_n du n^e paquet et le délai D_{n-1} du paquet qui le précède. Dans la littérature, cette définition de la gigue prend le nom de « IP Delay Variation (IPDV) » et est exprimé par la formule suivante :

$$G_n = D_n - D_{n-1} \quad (3.3)$$

Définition de gigue pour notre étude : La plupart des recherches utilisent la valeur absolue des différences dans leur études (i.e définition de l'IETF). La valeur absolue est utilisée afin d'éviter des problèmes de signe dans les analyses. On utilisera cette approche dans notre projet (Formule 3.4).

$$G_n = |D_n - D_{n-1}| \quad (3.4)$$

On utilise les recommandations énoncées dans [67, 69], présentées dans le Tableau 3.4, comme valeurs limites de gigue pour les trafics de VoIP et vidéo dans les simulations.

	Voix	Vidéo	Données
GIGUE	20 ms	20 ms	Sans Importance

TAB. 3.4 Valeurs maximales de la gigue utilisées dans l'étude

3.2.3.3 Le taux de perte des paquets

Le taux de perte de paquets dans les réseaux IP est le taux des paquets qui ont été transmis à travers le réseau et qui n'ont pas atteint leur destination finale. Plusieurs facteurs et problèmes dans les réseaux peuvent influencer le taux de pertes : la congestion du réseau qui remplit les tampons de chaque noeud, le temps de vie (« Time To Live (TTL) ») de chaque paquet expiré avant d'arriver à destination, la présence d'erreurs dans chaque paquet, entre autres. La perte de paquets est un phénomène qui diminue la performance des réseaux et qui a d'énormes conséquences sur la qualité des services offerts aux usagers. Pour la VoIP et la vidéo, de petites pertes peuvent être tolérées car il existe des mécanismes de reconstruction dans le décodage des signaux. Pour les transmissions sans fil, les paquets qui se perdent dans des collisions sont retransmis par la couche MAC, ce qui provoque une augmentation du délai bout à bout de ce paquet. [67,70] déterminent que le taux de pertes pour un système de VoIP/vidéo doit être inférieur à 3% pour que la qualité de la communication soit acceptable, et inférieur à 1% pour avoir une bonne qualité de communication. Dans ce travail, on utilisera cette dernière valeur comme limite de QoS. De plus, [71] suggère que les pertes ont un impact sur la vidéo plus important que tous les autres critères de QoS. En effet, une perte des trames « I » entraîne le non décodage des toute une séquence VOP.

D'autre part, les paquets qui arrivent en retard dans les applications en temps réel ne peuvent pas être utilisés dans le décodage des signaux. Dans ce contexte, les recommandations de l'IETF [72,73] suggèrent que les paquets qui arrivent en retard, c'est-à-dire les paquets qui ont un délai supérieur au seuil limite, soient considérés comme des paquets perdus et ne soient pas pris en considération dans le calcul du délai moyen. Désormais, l'IETF ne spécifie pas cette limite ce qui explique pourquoi plusieurs tests ont été effectués pour établir la valeur de ce seuil.

Le réseau sans fil 802.11b utilisé pour réaliser les tests préliminaires est décrit dans la Section 4.2. Ce réseau supporte entre 9 et 11 STAs transmettant des flots VoIP bidirectionnels aux noeuds câblés. Par exemple, pour le premier test préliminaire, on établit le seuil de délai à 60 ms et on exécute la simulation du réseau en présence de 9, 10 et 11 connexions VoIP. Par la suite, on calcule le pourcentage moyen des paquets qui sont rejetés parce qu'ils ne respectent pas la contrainte de délai fixé de 60 ms. Ce pourcentage représente les paquets en retard qui sont considérés comme perdus. On obtient par simulation les taux de pertes moyens suivants : 0.4%, 2.1%, et 7.6% pour 9, 10 et 11 connexions respectivement. Dans ce cas, uniquement 9 connexions sont admises dans le réseau car elles ne dépassent pas la limite du taux de pertes (i.e, le système ne doit pas admettre plus de 1% de paquets perdus). Par la suite, les autres tests préliminaires prennent en compte plusieurs seuils de délai variant entre 60 ms et 100 ms. Pour chacune de ces valeurs de seuil, on évalue leur influence sur le pourcentage moyen des pertes et donc leur influence sur le nombre de connexions qui sont admises par le système.

Pour une meilleure compréhension des résultats obtenus par les tests préliminaires, la Figure 3.4 montre le taux de pertes moyen, paquets qui dépassent le seuil, obtenu par les simulations préliminaires, en fonction de la valeur du seuil de délai (les intervalles de confiance à 95% sont indiqués sur la figure, voir Section 4.3.2). La valeur du taux de pertes est la valeur moyenne des 9, 10 et 11 connexions de VoIP simulées. On constate dans le graphique que pour 9 connexions, le pourcentage de paquets perdus est toujours

inférieur à 1%, pour 10 connexions le pourcentage diminue de 2% à 1% tandis que pour 11 connexions ce pourcentage diminue de 7% à 3%. Même avec la variation du seuil de délai qui augmente entre 60 ms et 100 ms, uniquement 9 connexions ne dépassent pas la limite de 1% du taux de pertes.

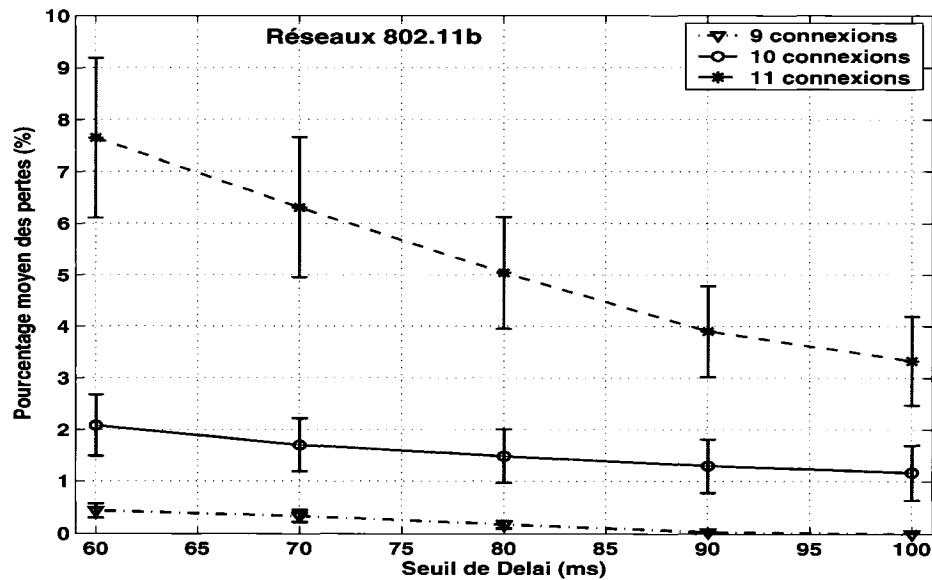


FIG. 3.4 Influence de la valeur du seuil de délai sur le taux de pertes

Cette étude préliminaire montre la faible influence du seuil de délai sur le nombre de connexions admises dans le réseau. Il faudrait augmenter ce seuil au delà de 100 ms pour admettre une connexion de plus dans le sans-fil. Alors, on a établi le seuil de délai à **75 ms** pour la VoIP et à **100 ms** pour la vidéo, tel que discuté dans la Section 3.2.3.1. De plus, le Tableau 3.5 présente les valeurs limites du taux de perte utilisé pour cette étude. Ce pourcentage limite doit inclure les paquets qui arrivent en retard ainsi que ceux qui sont perdus par collisions.

Il est aussi important de noter que chaque lien, ascendant et descendant, de chaque connexion doit indépendamment satisfaire tous ces critères de QoS. Pour plus de détails sur les mesures de qualité de service et la performance des réseaux, le lecteur peut consulter [74]. Ce document décrit les informations sur les modèles mathématiques de

	Voix	Vidéo	Données
TAUX PERTES	1 %	1 %	0

TAB. 3.5 Valeurs Maximales de Pertes utilisées dans l'étude

pertes et de délai, les paramètres pour établir une bonne QoS ainsi que les techniques et problèmes de la mesure des critères de performance. Plus particulièrement, [65, 75] analysent toutes les considérations importantes pour l'évaluation de la QoS de la VoIP.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION DU RÉSEAU SANS FIL 802.11

Le simulateur « NS Network Simulator », [76] a été choisi pour la modélisation et l'évaluation du système 802.11 WLAN. Dans ce chapitre, la Section 4.1 décrit les avantages de cet outil informatique, pour ensuite présenter dans la Section 4.2 la topologie du réseau utilisé pour les simulations. La Section 4.3 termine le chapitre en expliquant la méthodologie d'analyse des résultats obtenus pour calculer le nombre de connexions pouvant être admises dans le réseau.

4.1 Les avantages du simulateur NS-2

Pour cette étude, NS-2 a été choisi comme le simulateur du réseau sans fil car il possède plusieurs avantages face aux autres simulateurs. Tout d'abord, ce programme modulaire permet de sauvegarder chaque étape et ainsi la reprendre au même point plus tard. Cela donne un avantage en cas de panne d'électricité. Deuxièmement, il faut souligner que ce simulateur est « open source » et possède une structure hiérarchique. Ces caractéristiques permettent l'installation ou le développement de modules manquants, ainsi que l'accès au code source pour permettre l'extension du programme pour les nouvelles technologies et propositions de normes. Finalement, le dernier critère de sélection qui pèse en faveur de ce simulateur est le fait que chaque paquet peut être identifié facilement avec un numéro d'identité que la source émet. Différentes analyses statistiques des critères de performance pour chaque paquet ou flot pourront donc être réalisées. Les généralités du simulateur et des scripts réalisés se trouvent dans l'Annexe III.

4.2 Topologie du réseau de notre étude

Cette recherche utilise l'architecture d'une BSS avec infrastructure et se concentre dans le fonctionnement du lien multi-usager sans fil 802.11. La topologie de la Figure 4.1 est constituée de plusieurs STAs mobiles (STAs W_n), un point d'accès (AP) et plusieurs ordinateurs (N_n) reliés par un réseau câblé idéal sans pertes où les délais de files d'attente, de propagation et de transmission sont négligeables. Les paquets subissent donc des délais et pertes uniquement dans le lien sans fil. Dans les simulations, des combinaisons de trafics partagent le lien sans fil, c'est-à-dire qu'un groupe des STAs transmettra des paquets VoIP, un groupe de STAs transmettra des paquets de vidéo et un autre transmettra des paquets de données.

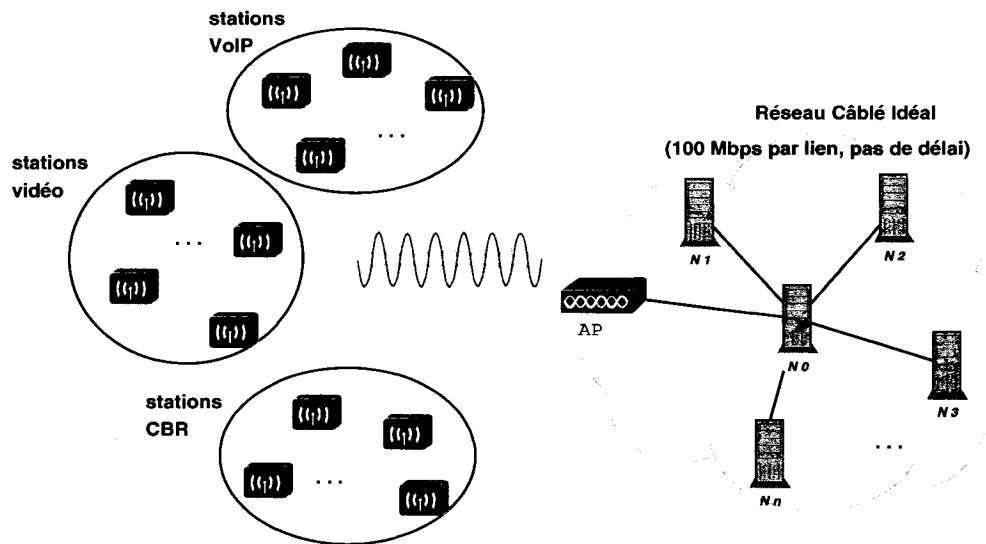


FIG. 4.1 Schéma du réseau simulé

La modélisation du canal dans le simulateur NS-2 est très simple car elle se base sur la utilisation d'un seuil pour savoir si le paquet a été envoyé correctement (voir Annexe III). Malheureusement, ce modèle n'est pas réaliste car il ne prend en compte les interférences, les évanouissements, et la probabilité d'erreur élevée, entre autres. Il est possible de modifier certains modules de C++ du simulateur afin de rendre le canal plus

réaliste. Cependant, ceci n'est pas le but de ce projet. Notre objectif est d'étudier uniquement le comportement de la couche MAC des réseaux sans fil 802.11. À cet effet, nous utilisons un canal physique idéal qui n'introduit pas d'erreurs. Par ailleurs, ni le phénomène des noeuds cachés ni le mécanisme DCF avec RTS/CTS ne sont traités dans nos simulations. Dans le modèle de simulation, les STAs ne bougent pas, donc le taux de transmission du canal utilisé est le plus haut possible, de 11 Mbps pour 802.11b et de 54 Mbps pour 802.11g. Par contre, les paquets de contrôle utilisent le débit le plus faible (i.e 1 Mbps pour 802.11b et 6 Mbps pour 802.11g), tel que requis par les normes, pour mieux les protéger contre les erreurs.

Une communication ascendante, ou uplink, s'établit uniquement entre une STA mobile et un noeud câblé ou vice-versa pour une communication descendante ou downlink, tel que présenté par la Figure 4.2. Si la communication est bidirectionnelle comme celle de la VoIP, des flots de données indépendants sont établis dans chaque direction. Si, par contre, la communication est unidirectionnelle, comme pour les trafics de données et de vidéo, les paquets sont transmis dans un seul sens. Ces deux directions de communication ont des caractéristiques de performance différentes, car le point d'accès (AP) a une charge de trafic plus élevée et aucune priorité d'accès au médium. Il est donc important d'étudier les caractéristiques de performance pour chacune des directions, même pour les communications bidirectionnelles.

Pour la simulation du réseau sans fil présenté auparavant (Figure 4.1), le *script Tcl* doit être basé sur le script présenté dans l'Annexe IV de ce document.

4.3 Analyse des résultats des simulations obtenus en NS-2

Après la programmation du script Tcl et la simulation en NS-2, on obtient comme résultat un fichier de trace avec toute les informations concernant la simulation. Plus de

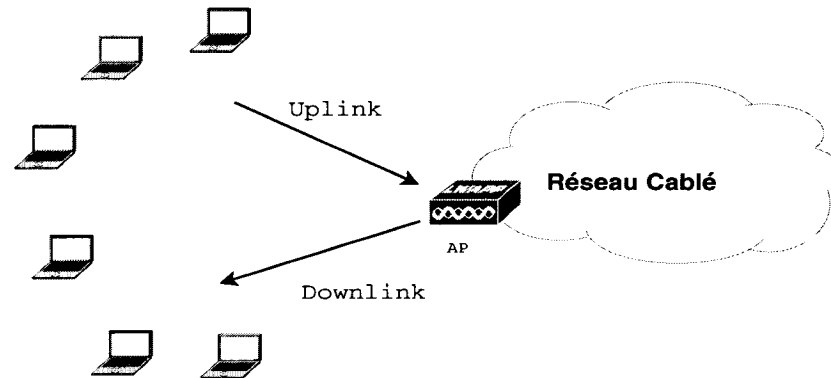


FIG. 4.2 Communication ascendante et descendante

détails sur ces informations se trouvent dans l'Annexe V. Après quelques tests préliminaires, nous nous sommes fixés arbitrairement une durée de simulation de 120 s. Cette durée de simulation est assez longue pour obtenir des statistiques concluantes et cela nous permet d'avoir des fichiers de trace de taille raisonnable et utilisable. Dans cette section, l'analyse de la trace de simulation est expliquée en détail pour permettre l'explication de la méthodologie utilisée pour calculer les critères de performance et obtenir le nombre maximal de connexions admises dans le réseau.

4.3.1 Calcul des critères de Performance

Comme on a vu dans la section précédente, le fichier trace doit être traité pour obtenir des statistiques des critères de performance de chaque paquet, tel que le délai, la gigue et le taux de pertes. Ce traitement est fait à l'aide de trois scripts écrits en langage « AWK », comme le montre la Figure 4.3. Ce langage de programmation a été choisi par sa facilité d'apprentissage, sa rapidité d'exécution et sa flexibilité dans la gestion des fichiers testes. Tout d'abord, le programme Delai.awk extrait le temps de départ et d'arrivée de chaque paquet et les transcrit dans des tableaux, en utilisant l'identité unique des paquets comme indice de référence. Le programme fait ensuite le calcul du délai de chaque pa-

quet ainsi que la moyenne du délai de chaque flot transmis dans le réseau. Par la suite, le programme Gigue.awk exécute la première partie du programme Délai.awk pour le calcul des délais de chaque paquet. Ensuite, il calcule les variations de ces délais en utilisant la Formule 3.4 de la Section 3.2.3. La gigue moyenne de chaque flot est obtenue à la fin de ce programme. Finalement, le programme Pertes.awk calcule le nombre de paquets perdus par rapport au nombre total des paquets générés par les sources et fournit le pourcentage de pertes pour chaque flot.

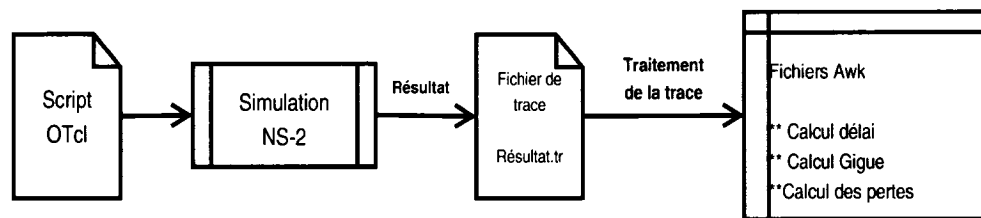


FIG. 4.3 Schéma général pour le calcul de critères de performance

4.3.2 L'intervalle de confiance utilisé

L'utilisation d'un modèle de simulation permet la cueillette des données pour le calcul des mesures de performance d'un réseau. Cependant, puisqu'il s'agit d'un modèle de simulation, il est important de déterminer le nombre de simulations requis pour obtenir des intervalles de confiance de 95%.

L'intervalle de confiance est une mesure statistique qui indique l'erreur associée avec les mesures moyennes. En d'autres mots, l'intervalle de confiance indique que dans 95% des cas la valeur réelle se trouvera dans cet intervalle. La simulation doit être reproduite N fois avec des sources aléatoires indépendantes chaque fois pour obtenir des mesures indépendantes x_1, x_2, \dots, x_N . À partir de ces N mesures, on obtient la valeur moyenne μ

d'un critère, avec la Formule 4.1.

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4.1)$$

Ensuite, pour obtenir l'intervalle de confiance pour cette moyenne, il faut tout d'abord obtenir l'écart-type σ avec la formule 4.2.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N - 1}} \quad (4.2)$$

Chaque simulation est répétée $N=10$ fois de sorte que les valeurs théoriques des critères de performance se trouvent dans l'intervalle de confiance I présenté par la Formule 4.3 avec une certitude de 95%.

$$I = \left(\mu - 1.812 \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \mu + 1.812 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right) \quad (4.3)$$

Le facteur de 1.812 est obtenu à partir du tableau de la *loi de distribution t* qui coïncide avec la valeur de 0.95. La loi de distribution normale n'est pas utilisé dans ce cas puisque le nombre de répétitions est petit. Pour plus d'informations concernant la théorie sur l'intervalle de confiance et les modèles de simulations, le lecteur peut se référer à [77].

4.3.3 Calcul automatisé du nombre de connexions maximales

Les outils de simulations présentés dans ce chapitre permettent d'établir le nombre de connexions des différents classes de trafic qu'un réseau sans fil peut supporter en respectant les contraintes de QoS de tous les flots pour une configuration du réseau. Le script *AUTO*, écrit en langage « Shell Script », a été développé pour automatiser ce processus

à travers la procédure présentée dans l'organigramme de la Figure 4.4. Au début de la simulation, un nombre initial de connexions d'une classe de trafic est fixé dans un fichier *Sessions*. Ce fichier est lu par le simulateur qui exécute la simulation pour passer ensuite à l'évaluation des critères de QoS. Le nombre de connexions du fichier *Sessions* est varié jusqu'à ce que le réseau dépasse au moins une contrainte des critères de QoS fixées dans la Section 3.2.1. Si le script détecte un dépassement de ces limites pour un seul flot, il s'arrête et affiche les résultats obtenus. Cette procédure est répétée N fois pour obtenir l'intervalle de confiance pour la configuration.

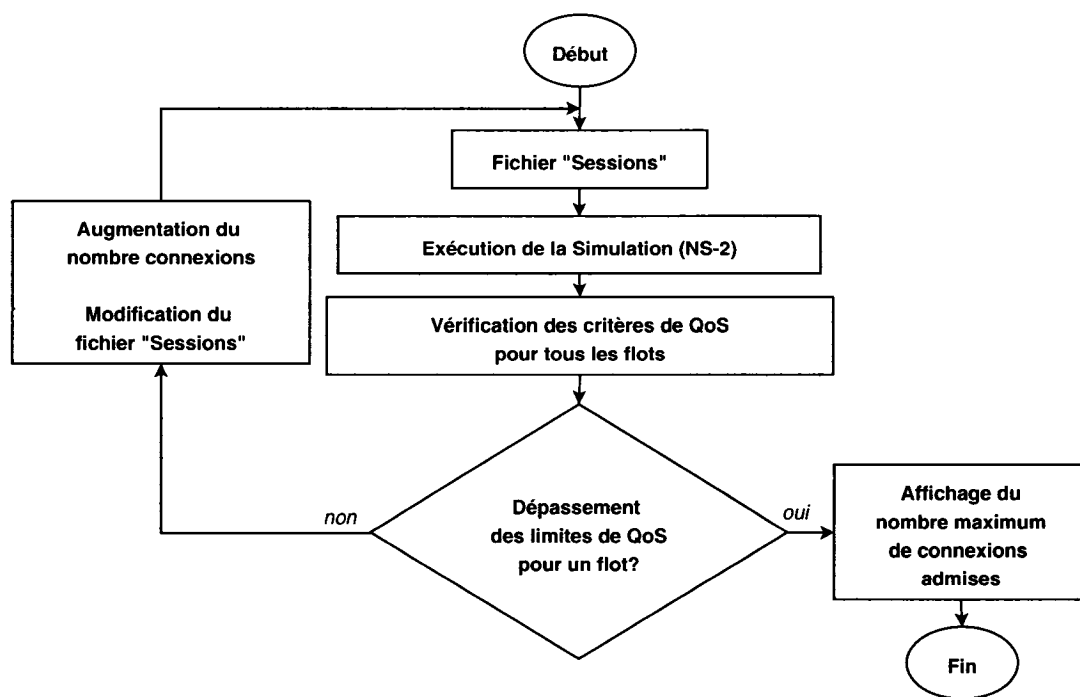


FIG. 4.4 Organigramme du script shell nommé *AUTO*

CHAPITRE 5

VALIDATION DU MODÈLE DE SIMULATION

Ce chapitre présente les validations réalisées sur les modèles et scripts de simulation pour en démontrer la fiabilité dans les calculs des critères de performance. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons réalisé deux tests dans les réseaux 802.11b pour comparer les résultats des analyses théoriques (inspirées de [10, 19]) avec les résultats obtenus pour les simulations : a) une analyse du débit théorique et expérimentale (Section 5.2) et b) une étude du nombre maximum des connexions CBR VoIP (Section 5.3). Les notations utilisées dans les analyses mathématiques des deux tests sont présentées dans la Section 5.1.

5.1 Liste des annotations mathématiques

Notation	Définition
n_{max}^e	Nombre maximum de connexions de VoIP (sources CBR) expérimentales
n_{max}^t	Nombre maximum de connexions de VoIP (sources CBR) théoriques
P_{col}	Probabilité de collisions dans le canal sans fil
R_{don}	Taux de transmission de paquets de données
R_{cont}	Taux de transmission de paquets de contrôle
t_{ACK}	Temps de transmission d'un paquet ACK
t_{cycle}	Temps d'un cycle pour la transmission d'un paquet
t_{slot}	Temps d'un « slot time »
$t_{overhead}$	Temps supplémentaire dans une transmission
t_P	Temps pour envoyer un paquet de P bytes
t_{fixe}	Partie du temps supplémentaire qui est constante
t_{BCK}	Partie du temps supplémentaire du processus de backoff
t_{PHY}	Temps de transmission de l'entête de la couche physique
t_s	Temps total de simulation
$t_{UDP/IP/MAC}$	Temps de transmission des entêtes des protocoles

W_e	Débit expérimental obtenu par simulations (Mb/s)
W_t	Débit théorique du canal (Mb/s)
β	Quantité de bits reçus expérimentalement par la destination
ε	Erreur relative
η	Nombre de « slots time » disponibles dans le canal sans fil
ρ	Débit moyen duplex d'un CODEC pour une connexion

5.2 Test1 : Calcul du débit réel d'un réseau 802.11b

Pour valider les programmes réalisés, on veut réaliser la comparaison entre le débit effectif théorique W_t et le débit expérimental à la sortie du simulateur W_e en calculant l'erreur relative ε entre ces deux valeurs. Une analyse théorique et expérimentale du comportement du débit en fonction de la taille de paquets est donc envisagée dans un réseau 802.11b qui comprend un seul usager qui envoie du trafic UDP constamment. On présente le temps d'overhead pour calculer le débit théorique en variant la taille du paquet de la source CBR entre 128 Bytes et 1440 Bytes et en laissant le taux de la source constant. Ensuite, plusieurs simulations sont effectuées pour le calcul du débit expérimentale en fonction de ces tailles de paquets.

5.2.1 Temps d'overhead pour la transmission d'un paquet

La durée d'un cycle pour la transmission sans collisions d'un paquet de P Bytes comprend le temps requis pour envoyer le paquet auquel on ajoute le temps d'overhead, connu aussi comme temps supplémentaire : $t_{cycle} = t_P + t_{overhead}$. Un cycle est représentée à la Figure 5.1.

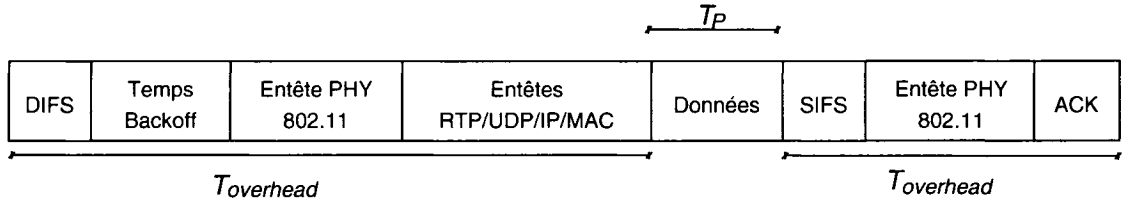


FIG. 5.1 Cycle pour la transmission d'un paquet

Le temps pour envoyer un paquet de P bytes est égal à la taille du payload en bits ($P * 8$) divisé par le taux de transmission des données R_{don} :

$$t_P = P * 8 / R_{don} \quad (5.1)$$

D'autre part, tel qu'expliqué dans la Formule 5.2, le temps d'overhead est composé par une valeur constante t_{fixe} et par une valeur variable de temps t_{BCK} imposée par le fonctionnement du processus de backoff du mécanisme d'accès au médium DCF. Dans la valeur de temps constante, on retrouve le temps entre trames *DIFS* ou *SIFS*, le temps du préambule et du PLCP de la couche physique, le temps de transmission des bytes des entêtes des protocoles $t_{UDP/IP/MAC}$ et le temps pour la transmission de l'acquittement $t_{ACK} = 14 \times 8 / R_{cont}$. À noter que la valeur du préambule est multipliée par 2 car le paquet de données et l'acquittement ont besoin du préambule physique pour leur transmission.

$$t_{overhead} = DIFS + t_{BCK} + 2 \times t_{PHY} + t_{UDP/IP/MAC} + SIFS + t_{ACK} \quad (5.2)$$

Le tableau 5.2 présente les tailles des entêtes utilisées par NS-2, les valeurs caractéristiques de la couche physique des protocoles 802.11b/802.11g ainsi que le temps pris par chacune de ces valeurs pendant une transmission. Ces valeurs permettront de calculer le temps d'overhead fixe dans un cycle de transmission. À noter que les codes sources de NS-2 ne génèrent pas l'entête de protocole UDP de 8 Bytes. De plus, NS-2 ne simule pas

le champ « adresse 4 » de la couche MAC car il s'agit d'un champ optionnel qui n'existe pas dans la plupart de paquets transmis à travers les réseaux sans fil.

Raison d'overhead	Taille (Bytes)	Temps utilisé (μs)	
		802.11b	802.11g
Couche UDP (t_{UDP})	0	0	0
Couche IP (t_{IP})	20	14.54	2.97
Couche MAC (t_{MAC})	28	20.36	4.15
ACK (t_{ACK})	14	112	18.67
Couche PHY (t_{PHY})	Court : 15	120	20
	Long : 24	192	–
SIFS (t_{SIFS})	–	10	10
DIFS (t_{DIFS})	–	50	28

TAB. 5.2 Overhead fixe par paquet envoyé pour les réseaux 802.11b

L'overhead variable t_{BCK} est une fonction du nombre de clients du réseau tel qu'indiqué dans la Formule 5.3. Il est déterminé par la probabilité des collisions dans le lien et le temps moyen pris par le nombre de « slots time » libres ou disponibles dans le canal η . Le temps d'un slot, t_{slot} , est spécifié par la couche physique et il est présenté dans le Tableau 1.2. À noter que si un paquet arrive et le médium est libre pendant DIFS secondes, la transmission peut immédiatement avoir lieu. Cependant, NS-2 ignore ce cas et tous les paquets utilisent la procédure de backoff avant d'être transmis.

$$t_{BCK} = \eta * t_{slot} + P_{col} * (t_p + t_{fixe}) \quad (5.3)$$

À titre d'exemple, si le réseau WLAN 802.11b a un seul client ayant toujours une trame à envoyer, il y a en moyenne 15.5 slots disponibles dans le canal de 30 slots. P_{col} est nulle car il y a un seul client dans le réseau. Dans ce contexte, la valeur variable t_{BCK} de cette situation correspond à la Formule 5.4 :

$$t_{BCK} (1 \text{ usager}) = \frac{CW_{min}}{2} * t_{slot} = 15.5 * t_{slot} = 15.5 * 20\mu s = 310\mu s \quad (5.4)$$

La combinaison de ce dernier calcul du t_{BCK} et de la Formule 5.2 permet de préciser la valeur du temps d'overhead total pour envoyer des paquets dans des réseaux sans fil dans lequel un seul usager a toujours une trame à envoyer. Le Tableau 5.3 reporte le t_{BCK} pour les deux normes utilisées dans cette étude : 802.11b et 802.11g.

Standard	$t_{overhead} \ (\mu s)$
802.11 b Court préambule	$50 + 310 + 2 * 120 + 34.9 + 10 + 112 = 756.9$
802.11 b Long Préambule	$50 + 310 + 2 * 192 + 34.9 + 10 + 112 = 900.9$
802.11 g	$28 + 67.5 + 2 * 20 + 7.11 + 10 + 18.67 = 171.3$

TAB. 5.3 Temps total d'overhead par paquet envoyé pour les réseaux 802.11b/802.11g

Cependant, si plusieurs clients utilisent le réseau, alors le nombre de slots disponibles dans le canal η diminue et la probabilité de collisions entre les paquets augmente. Par exemple, dans le cas où deux clients ont toujours une trame à envoyer, le nombre moyen de slots disponible diminue à 8.5 (au lieu de 15.5) et la probabilité de collision devient égale à 0.03 [10]. L'équation 5.5 présente la valeur t_{BCK} en présence de deux clients et en utilisant l'entête du long préambule de la couche physique 802.11b.

$$\begin{aligned}
 t_{BCK} (2 \text{ usagers}) &= 8.5 * 20\mu s + 0.03 * (t_P + t_{fixe}) \\
 &= 170\mu s + 0.03 * 591\mu s + 0.03t_P \\
 &= 187.7\mu s + 0.03t_P
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Pour plus d'informations sur l'impact du nombre d'utilisateurs sur la disponibilité du canal (nombre de time slots libres) et la probabilité de collision, il est conseillé de se référer à des travaux sur le débit et la performance des réseaux 802.11 [8, 10, 64].

5.2.2 Étude du débit pour un réseau WLAN 802.11

Tel qu'exposé dans [10,19], le calcul théorique du débit réel du canal W_t s'effectue à partir de la valeur du temps pour transmettre le payload de P Bytes t_P , le temps d'overhead de cette transmission $t_{overhead}$ et le taux de transmission du canal R_{don} . Cette relation est exposée par la Formule 5.6.

$$W_t = \frac{t_P}{t_P + t_{overhead}} * R_{don} \quad (5.6)$$

Par exemple, si on considère un réseau 802.11b avec un taux de transmission de données de 11 Mbps où un seul usager transmet constamment des paquets UDP de taille 1440 Bytes en utilisant un préambule PHY court, le temps pour envoyer un paquet est de $1047 \mu s$ (i.e $t_P = (1440 \times 8)/11$) et le temps d'overhead est de $757 \mu s$ (valeur calculée avec la Formule 5.2 et le Tableau 5.2). Dans ce contexte, le débit théorique du canal est donc égale à :

$$W_t = \frac{1047.27}{1047.27 + 757} * 11 \approx 6.385 \text{ Mbps} \quad (5.7)$$

D'autre part, le débit expérimental W_e est calculé à partir de la quantité de bits reçus β par une destination pendant un temps de simulation t_s , divisé par la valeur de ce temps de simulation (Formule 5.8). Cette valeur expérimentale est calculée avec un petit script écrit en langage Tcl qui présente comme résultat la valeur moyenne du débit obtenu.

$$W_e = \frac{\beta \times 8}{t_s} \quad (5.8)$$

Le Tableau 5.4 présente les débits théoriques calculés en fonction de la taille des paquets avec la Formule 5.6, les débits expérimentaux des simulations et l'erreur relative,

calculée en utilisant la Formule 5.9, entre ces deux valeurs.

$$\varepsilon (\%) = \frac{|W_t - W_e|}{W_t} * 100 \quad (5.9)$$

Taille du paquet (Bytes)	Débit théorique (Mbps)	Débit Expérimental (Mbps)	Erreur Relative (%)
128	1,205	1,215	0,914
256	2,171	2,188	0,783
512	3,627	3,648	0,579
1024	5,455	5,475	0,367
1440	6,385	6,397	0,094

TAB. 5.4 Résultats obtenus de la variation du débit

La faible différence entre les valeurs théoriques et les résultats des simulations permettent de vérifier la validité des scripts réalisés (i.e l'erreur relative est toujours inférieure à 1%). Par la suite, on peut vérifier aussi que le débit augmente avec la taille des paquets. Ceci correspond à une des plus importantes conclusions obtenues dans [10]. Les grands paquets augmentent l'efficacité du canal sans fil et du fonctionnement de la méthode d'accès au médium DCF. Mais, ceci est un aspect défavorable pour les flots en temps réel car la QoS offerte aux usagers se voit affectée avec la présence des grands paquets. Il est donc toujours nécessaire de faire un compromis entre la taille des paquets et la performance du canal.

5.3 Test 2 : Nombre de sessions CBR pour un réseau WLAN 802.11b

Comme on l'a vu dans le Chapitre 2, plusieurs études évaluent la quantité d'appels pouvant être écoulés par les systèmes sans fil. Inspiré par l'étude présentée dans [19], le calcul du nombre maximal de connexions VoIP utilisant des sources CBR est établi comme le

rapport entre le débit effectif théorique du canal W_t (Formule 5.6) et le débit moyen ρ en bits par seconde utilisé par le CODEC dans une connexion bidirectionnelle de VoIP :

$$n_{max}^t = \left\lfloor \frac{W_t}{\rho} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{t_P}{t_P + t_{overhead}} * \frac{R_{don}}{\rho} \right\rfloor \quad (5.10)$$

À noter que Garg et al. [19] supposent que la probabilité de collisions est négligeable. Avec le même réseau WLAN 802.11b décrit dans la Section 5.2, on considère qu'un appel bidirectionnel de VoIP est composé de deux flots CBR, un en mode ascendant et un autre en mode descendant. Les CODECs analysés et simulés seront G.711 et G.729 avec des paquets transmis chaque 10 ms et 20 ms (Tableau 3.1). Dans ces cas, l'utilisation des ressources pour un appel bidirectionnel est de 128Kbps pour le CODEC G.711 et de 16Kbps pour le CODEC G.729. Par exemple, l'analyse théorique montre que le nombre maximal de connexions de VoIP n_{max}^t est égal à 6 quand l'appel de VoIP utilise le CODEC G.711 (i.e débit de 64 Kbps) et des paquets transmis à des intervalles de 10 ms. La taille de chaque paquet dans ce cas est de 80 Bytes. Le nombre de connexions maximal est calculé en fonction du temps pour l'envoi d'un paquet de VoIP, $t_P = (80 \times 8)/11 = 58.18\mu s$, et le temps d'overhead de la transmission, $t_{overhead} = 757\mu s$, est calculée avec la Formule 5.2 et le Tableau 5.2.

$$n_{max}^t = \left\lfloor \frac{t_P}{t_P + t_{overhead}} * \frac{R_{don}}{\rho} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{58.18}{815.18} * \frac{11 * 10^6}{2 * 64 * 10^3} \right\rfloor = \lfloor 6.133 \rfloor = \mathbf{6} \quad (5.11)$$

D'autre part, le modèle de simulation utilisé pour calculer le nombre maximal de connexions VoIP CBR est décrit dans la Section 4.2. Ce modèle exécute la simulation d'un réseau WLAN 802.11b en présence de n connexions bidirectionnelles de VoIP. La valeur n_{max}^e expérimentale est égale au nombre maximal des connexions admises par le modèle de simulation du réseau 802.11b sans atteindre les limites des critères de QoS fixées dans la Section 3.2. On compare alors les valeurs n_{max}^t et n_{max}^e .

Les résultats des simulations montrent que le critère de QoS qui limite le nombre de connexions VoIP CBR admissibles est le délai moyen des liens descendants. Ce critère limite la capacité des réseaux WLANs 802.11 car l'AP a plus de charge que le reste des stations et devient le goulot d'étranglement du réseau. En effet, les variations du délai moyen des liens descendants augmente considérablement en fonction du nombre de connexions qui se trouvent dans le système. Ceci est montré dans la Figure 5.2 pour tous les CODECs considérés dans cette étude (G.711 - 10 ms, G.711 - 20 ms, G.729 - 10 ms, G.729 - 20 ms).

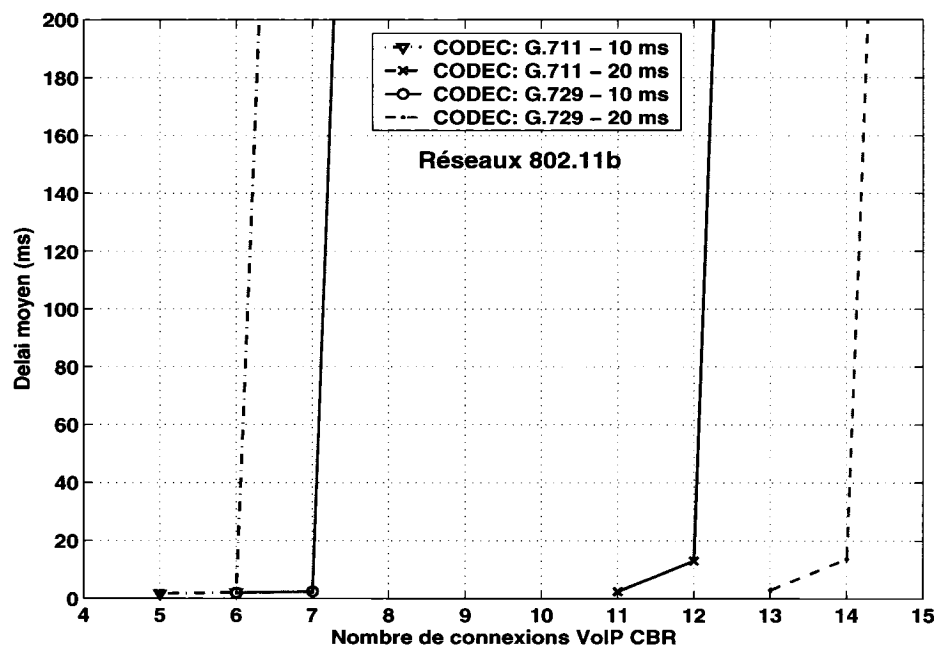


FIG. 5.2 Délai moyen des flots VoIP CBR descendants

Pour vérifier les résultats obtenus par simulation, on reprend l'exemple de l'analyse théorique présenté auparavant (CODEC G.711 - 10 ms). Avec ces caractéristiques du CODEC, le graphique montre que le délai des liens descendants varie d'une valeur presque nulle à une valeur supérieure à 200 ms entre 6 et 7 connexions. Cette valeur de délai est inacceptable pour la QoS reçue par les usagers. Selon ces résultats, le système ne peut accepter que 6 connexions dans le réseau. Ce dernier résultat confirme les résultats

analytiques obtenus auparavant. Le graphique 5.2 montre que le nombre de connexions maximal selon le CODEC et l'intervalle choisi est :

- CODEC G.711 et intervalle 10 ms : $n_{max}^e = 6$ connexions
- CODEC G.711 et intervalle 20 ms : $n_{max}^e = 12$ connexions
- CODEC G.729 et intervalle 10 ms : $n_{max}^e = 7$ connexions
- CODEC G.729 et intervalle 20 ms : $n_{max}^e = 15$ connexions

Ces résultats numériques correspondent aux résultats théoriques calculés avec la Formule 5.10 et ceux présentés dans [19]. Une des conclusions des recherches de Garg et al. [19] est vérifiée par ces simulations : le choix du CODEC influence peu la capacité des réseaux sans fil, même s'il existe une importante différence de débit entre le CODEC G.711 à 64 Kb/s et le G.729 à 8 Kb/s. Cependant, l'intervalle de paquetisation a un impact important sur la capacité du 802.11. Les scripts de simulations donnent des résultats fiables car les résultats des simulations concordent avec les analyses théoriques. Ces programmes sont donc valides pour le calcul de la bande passante effective et le reste de cette étude.

CHAPITRE 6

LA BANDE PASSANTE EFFECTIVE

Les travaux discutés dans le Chapitre 2 présentent des analyses de la capacité maximale d'un réseau WLAN à supporter des connexions de VoIP/vidéo. De plus, ils démontrent que la Qualité de Service (QoS) des connexions actives est affectée si ce nombre maximum est dépassé avec une connexion de plus. Dans ce contexte, il est indispensable d'instaurer un mécanisme qui **Contrôle l'Admission des Connexions** (CAC) en fonction des ressources disponibles dans le réseau pour éviter la dégradation de la QoS du système. Différentes approches de CAC ont été proposés pour les réseaux 802.11. Cependant, ces techniques sont complexes et ne peuvent être mises en place aisément dans des réseaux réels. Une autre approche intéressante pour réaliser le CAC, d'ailleurs utilisée dans les réseaux ATM, est basée sur les notions des *Régions d'Admissions* et de *Bande Passante Effective* (BPE). Le CAC basée sur la BPE définit une région linéaire d'admission qui peut être facilement utilisé dans les réseaux. Nous allons donc déterminer si un tel CAC peut aussi être utilisé pour le 802.11. Ces notions sont introduites dans la Section 6.1. La Section 6.2 présente par la suite la méthodologie de travail utilisée pour évaluer la BPE de chaque source dans les réseaux WLAN. La Section 6.3 conclut le chapitre avec les valeurs de BPE obtenues pour chaque classe de trafic. Le CAC sera discuté dans le Chapitre 7.

6.1 Explication théorique de la BPE

Le mécanisme de CAC doit connaître la *Région d'Admission* du système afin de déterminer si une nouvelle connexion peut être admise dans un réseau. Pour définir la *région*

d'admission, supposons que le réseau fonctionne avec deux classes de trafic avec différentes priorités ($i = 1, 2$). Soit N_i le nombre de connexions de la classe de trafic i . On considère les points du plan (N_1, N_2) montré par la Figure 6.1. La partie du plan où toutes les connexions reçoivent la QoS dont elles ont besoin est définie comme la *région d'admission* du système. [78] suggère que la limite de la région d'admission pourrait être approximée par une fonction linéaire (ce qui n'est pas toujours le cas).

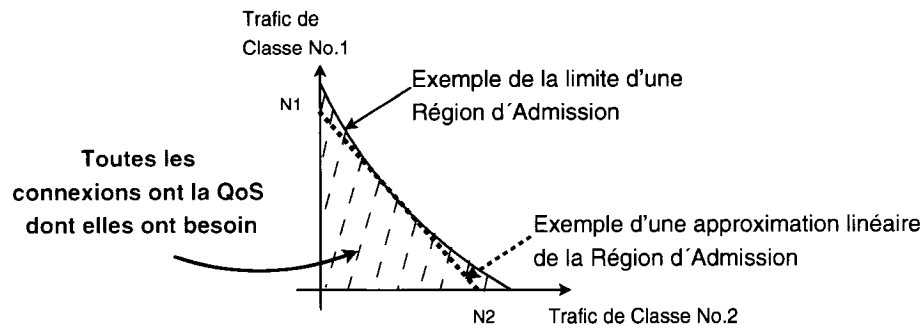


FIG. 6.1 Définition de la Région d'Admission

D'autre part, le concept de *Bande Passante Effective (BPE)* d'une source provient des réseaux orientés connexion. La BPE représente la quantité minimale de bande passante nécessaire pour qu'un flot satisfasse tous ses besoins de QoS pendant la durée de sa connexion. La BPE dépend de plusieurs facteurs, dont la QoS de la connexion, les ressources disponibles dans le réseau et le mécanisme d'accès de la couche MAC. La BPE assignée à chaque connexion fournit la valeur de l'utilisation des ressources d'une source en respectant ses exigences de QoS. Elle peut donc être considérée comme critère d'admission pour le CAC. Cette approche a déjà été utilisée pour les réseaux large bande ATM dans [3, 54–57] ainsi que pour les liens câblés [2, 58]. Une définition plus générale de la BPE se trouve dans [79].

Dans ce projet, une méthode par simulation est présentée pour estimer la BPE de chaque classe i de trafic selon ses critères de QoS. Soit C la capacité du lien du réseau WLAN qui est la bande passante totale du lien exprimée en Kbits/sec, et N_i^* le nombre de

connexions maximum pouvant être admises dans le réseau WLAN. Les N_i^* sont les valeurs qui coupent les axes dans la Figure 6.1. Alors on définit la BPE W_i d'une connexion de classe i en fonction de C et de N_i^* tel que montré par la Formule 6.1.

$$W_i = \frac{C}{N_i^*} \quad \text{Kbits/sec} \quad (6.1)$$

Il suffit donc d'estimer, par simulation, la quantité de connexions maximales de chaque classe de trafic (voix, données et vidéo) qui ne dépassent pas les critères de QoS dans les réseaux WLAN 802.11b/g. Si la région d'admission du lien sans fil est *linéaire*, le CAC peut être réalisé en utilisant le fait que la BPE de plusieurs classes de trafics partageant un lien peut s'additionner jusqu'à obtenir la capacité totale du lien. En d'autres mots, le vecteur des connexions $\{N_1, N_2, \dots, N_I\}$, où I est le nombre de classes de trafics dans le réseau, est admissible si l'équation 6.2 est respectée.

$$\sum_{i=1}^I W_i N_i \leq C \quad \text{Kbits/sec.} \quad (6.2)$$

Dans ce contexte, le problème qui se pose est de déterminer si les régions d'admission des réseaux sans fil 802.11 sont approximativement linéaires pour réaliser le CAC.

6.2 Méthodologie pour l'estimation de la BPE

La topologie utilisé pour l'étude des liens WLAN est représentée à la Figure 4.1 où plusieurs terminaux avec des trafic de différentes classes partagent le même lien sans fil 802.11b/802.11g. Comme nous avons vu, il faut tout d'abord évaluer le nombre maximal de connexions d'une classe de trafic supporté par le lien sans fil pour obtenir sa valeur

correspondante de BPE. La méthodologie à suivre pour l'évaluation par simulation du nombre des connexions maximales de trafics en temps réel (VoIP/vidéo) est la suivante :

1. Exécuter la simulation du réseau sans fil en présence d'un seul trafic : la VoIP ou la Vidéo et évaluer les différents critères de QoS (délai, gigue et pertes) pour chaque classe de trafic
2. Déterminer le nombre maximal de connexions de VoIP/vidéo qui ne dépassent AUCUNE des limites des critères de QoS présentées dans la Section 3.2.
3. Calculer la valeur de la BPE de chaque classe de trafic avec la Formule 6.1

D'autre part, les critères de QoS des flots de données n'ont pas de limites strictes. Le nombre maximal de connexions de données CBR ne peut donc pas être calculé avec cette méthodologie. Par contre, selon la Figure 6.1 et en supposant que le trafic de données appartient à la classe de trafic 2, ce maximum peut être estimé en déterminant l'intersection de la région d'admission avec l'axe d'abscisses du plan. Cette intersection sera évaluée par simulation avec la détermination des régions d'admission dans le Chapitre 7.

6.2.1 Nombre maximum de sessions de VoIP

Pour établir le nombre maximum de sessions de VoIP, des mesures de délai, gigue et perte de paquets sont effectuées par simulation. On note N_p^* le nombre de sessions maximum déterminé par la limite du taux de pertes, N_d^* celui déterminé par le délai et N_g^* pour le maximum selon le critère de la gigue. À la fin, le nombre de session admises N^* est égal au minimum des sessions admises d'après les trois critères de performance, $N^* = \min(N_p^*, N_d^*, N_g^*)$. Les limites des critères de performance se trouvent dans la Section 3.2. Pour l'étude des traffics de VoIP, les mesures prises sur le taux de pertes, le délai et la gigue sont évaluées pour les CODECs G.711 et G.729 avec des valeurs des intervalles de paquetisation de 10 ms et 20 ms.

Pour illustrer la procédure de travail, les valeurs de ces critères de QoS seront présentées graphiquement pour le cas d'étude en présence du CODEC G.711 et 10 ms d'intervalle de paquetisation. Les résultats obtenus pour les simulations avec d'autres paramètres sont présentés dans un tableau résumé à la fin de la section. À noter que tous les flots dans la même direction, UP ou DOWN, ont en moyenne les mêmes taux de pertes, délai et gigue.

Mesure du taux de pertes.- Le taux de pertes est définie dans la Section 3.2.3 par le nombre de paquets perdus lors de collisions et par les paquets qui sont rejetés parce qu'ils sont en retard. La Figure 6.2 présente le taux de de pertes des liens ascendants (UP) et des liens descendants (DN) en fonction du nombre de connexions bidirectionnelles de VoIP. La figure montre que le taux de pertes moyen de liens UP est presque nul et ne dépasse pas le maximum de 1%, même avec 13 et 14 connexions admises tandis que le taux de pertes moyen de liens DN dépasse les 30% pour ce même nombre de connexions. Selon ce critère de performance, le nombre de sessions de VoIP bidirectionnelles qui peuvent être admises N_p^* , c'est-à-dire le nombre de sessions qui n'excèdent pas les limites de QoS, est égal à 9 connexions.

Mesures du Délai.- Les paquets qui arrivent en retard avec un délai supérieur à 75 ms sont rejetés et ils ne sont pas considérés pour le calcul du délai. Ceci a comme conséquence que le délai moyen des paquets reçus reste faible. La Figure 6.3 présente les délais moyens des liens UP et des liens DN (valeurs en millisecondes) en fonction du nombre de connexions bidirectionnelles de VoIP. La valeur moyenne du délai des liens descendants est toujours beaucoup plus élevée que celle des liens ascendants. Pour 13 et 14 connexions, la valeur moyenne du délai des liens DN dépasse les 14 ms alors que la valeur moyenne du délai des liens UP n'arrive même pas aux 3 ms. Même si le délai des liens descendants est un critère sensible à la présence de connexions de VoIP, il ne limite pas le nombre maximal de sessions admises car la valeur moyenne de ce critère n'atteint pas la limite de QoS de 75 ms.

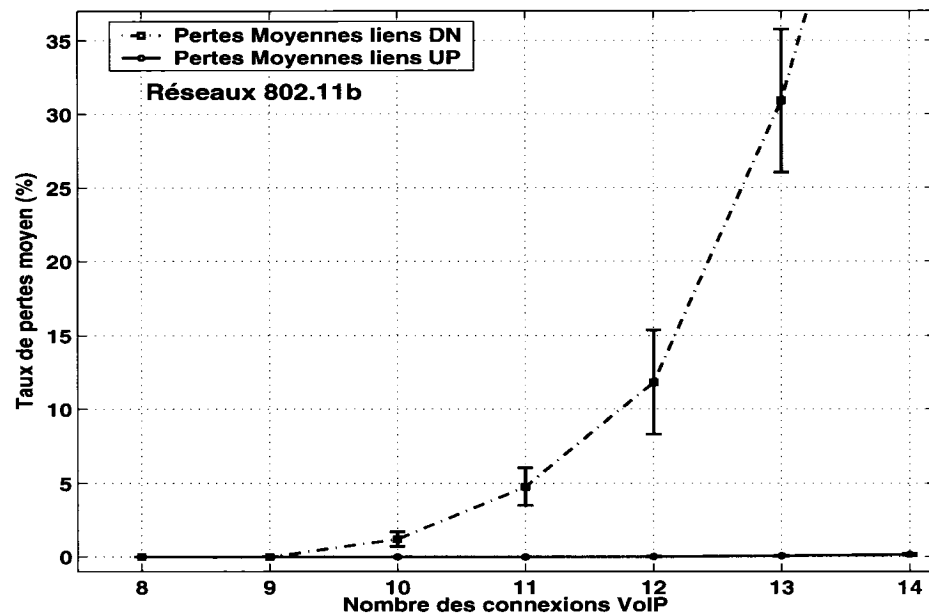


FIG. 6.2 Taux de pertes en fonction du nombre de sessions VoIP (CODEC G711, 10 ms)

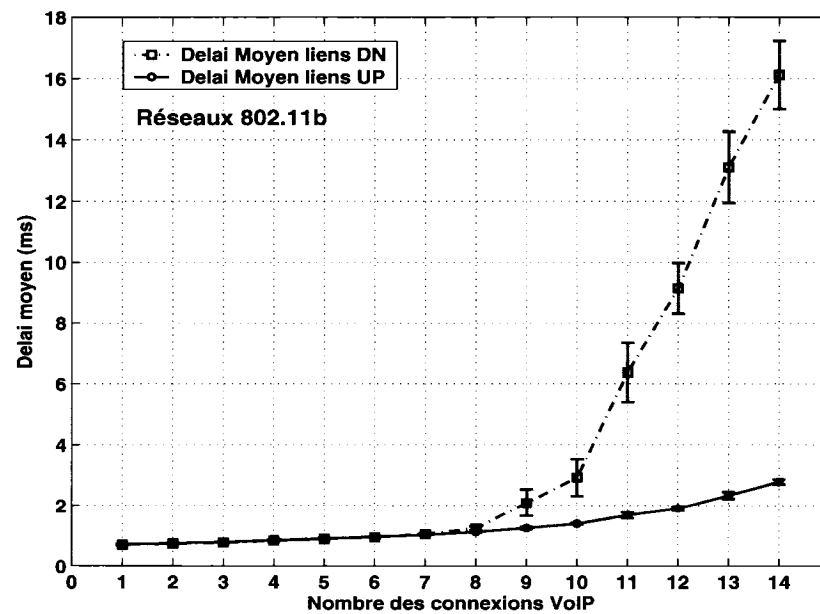


FIG. 6.3 Délai en fonction du nombre de sessions de VoIP (CODEC G711, 10 ms)

Mesure de Gigue.- La Figure 6.4 montre la variation de la gigue moyenne (en ms) des liens UP et DN en fonction du nombre de connexions de VoIP présentes dans le réseau. La valeur de ce critère est aussi très petite. Selon le graphique, la gigue moyenne de 14 connexions n'atteint même pas les 6 ms pour les liens DN et les 2 ms pour les liens UP. De même que le critère du délai moyen, la gigue moyenne n'est pas un critère de performance limitant le nombre de sessions admises. La limite de 20 ms de gigue moyenne n'est jamais atteinte pour le même nombre de connexions où le taux de pertes est déjà très important et a déjà dépassé ses limites de QoS.

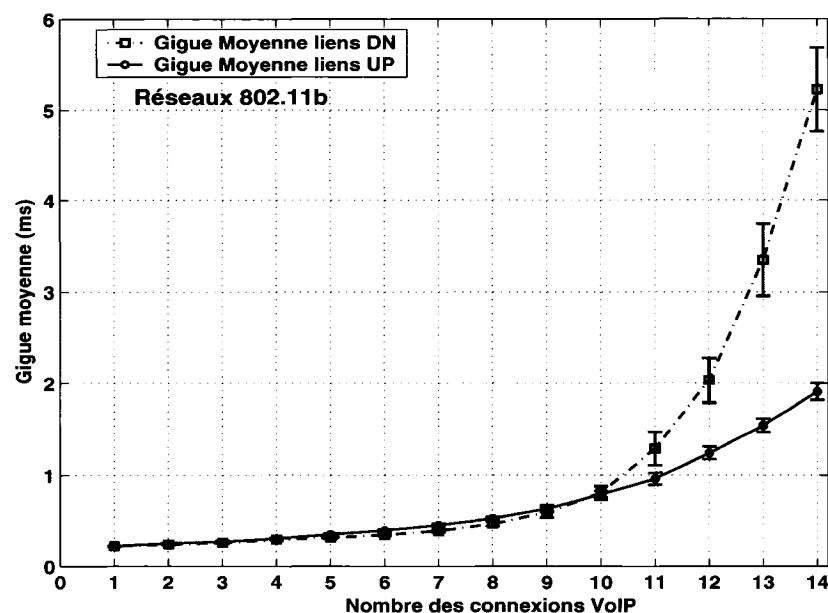


FIG. 6.4 Gigue en fonction du nombre de sessions de VoIP (CODEC G711, 10 ms)

Tableau résumé du nombre maximal de sessions de VoIP.- Après l'analyse des différents critères de performance (taux de pertes, délai et gigue), le nombre de sessions admises N^* pour le CODEC G.711 et un intervalle de paquetisation de 10 ms d'audio est égal à 9. Dans ce cas, le taux de pertes est le critère de performance qui s'impose sur les autres critères et limite le nombre maximal de connexions de VoIP. Les tests de cette première étape sont répétés avec les CODECs G.711/G.729 ainsi qu'avec des intervalles de paquetisation de 10 ms et 20 ms pour les normes 802.11b et 802.11g. Le Tableau 6.1

donne le nombre de sessions de voix n'excédant pas les limites de QoS en fonction du CODEC, de l'intervalle de paquetisation et de la norme choisie.

Norme	Intervalle de paquetisation	CODEC G.711	CODEC G.729
		No. max de sessions	No. max de sessions
802.11b	10 ms	9	10
	20 ms	19	23
802.11g	10 ms	68	73
	20 ms	122	128

TAB. 6.1 Nombre maximal de sessions VoIP en fonction du CODEC et du payload

Ces résultats démontrent d'abord que seulement un petit nombre de sessions de VoIP peut être supportée par un réseau même s'il possède un lien de haute capacité. Par exemple, seulement 10 connexions sont admises avec un CODEC G.729 qui transmet des paquets de 10 ms de payload dans un lien qui a un débit de 11 Mbps. Cette faible performance est due au fonctionnement de la couche MAC et plus précisément du processus de contention DCF. On constate aussi qu'il est beaucoup plus intéressant d'augmenter la longueur de l'intervalle de paquetisation pour obtenir une meilleure performance de ces réseaux sans fil. En effet, le temps d'attente ou d'overhead affecte davantage les paquets de petite taille que ceux de grande taille puisque le fait de transmettre un plus grand nombre de petits paquets entraîne une importante perte de temps du processus de contention du mécanisme DCF. Dans ce cas, le système passe plus de temps à réaliser le processus de contention qu'à transmettre le paquet à travers le réseau. Il est donc important de faire un compromis entre la taille du payload et les critères de performance qui se dégradent avec cette augmentation. Par exemple le temps plus long de l'intervalle de paquetisation entraîne une augmentation de la taille des paquets de VoIP et cette augmentation provoque un délai bout en bout et un temps perdu lors d'une collision plus importants.

D'autre part, si on compare avec les réseaux câblés, on constate que le choix du CODEC n'influence pas de façon très significative le nombre de connexions admises par le réseau WLAN, un résultat aussi démontré par [19, 22]. Même si le CODEC G.729 a un taux de compression huit fois plus grand que le CODEC G.711, le nombre de sessions admises ne varie pas en proportion. Le reste de cette étude se concentrera donc sur l'analyse de la performance du CODEC G.711 qui se rapproche au fonctionnement de la téléphonie traditionnelle.

6.2.2 Nombre maximal de sessions Vidéo

Pour déterminer le nombre maximal de connexions vidéo, on utilise la même méthode que pour la VoIP. Dans le cas de la vidéo, le flot de données est unidirectionnel, donc deux cas sont analysés : une transmission vidéo ascendante en direction des stations vers l'AP ou une transmission vidéo descendante en direction de l'AP vers les stations. Le Tableau 6.2 présente les résultats obtenus pour chaque cas dans les réseaux 802.11b/802.11g.

Norme	No. max de sessions UP	No. max de sessions DN
802.11b	12	12
802.11g	61	79

TAB. 6.2 Nombre maximal de sessions vidéo en fonction de la direction des flots

La performance du réseau, en présence des flots de vidéo avec un débit moyen de 2.1 Mbps, reste très faible même si ces derniers ont une distribution de tailles de paquets non-uniforme et envoient un nombre plus important de grands paquets que les sources de VoIP. Ceci peut être dû au débit moyen de la source ou à l'augmentation du temps de contention avec des plus longs paquets. Par exemple, avec un débit de canal plus élevé (802.11g), le nombre de connexions vidéo en direction DN sans contentio est

supérieur à la direction UP avec contention. Un grand nombre de stations avec de long paquets engagés dans le processus de contention affecte donc l'efficacité du canal sans fil puisque le pourcentage de collisions ainsi que le temps d'attente aux stations sont très importants.

6.3 BPE des applications en temps réel

L'estimation de la BPE pour chaque classe de trafic est nécessaire pour réaliser le mécanisme de CAC dans les WLANs. La Formule 6.1 est utilisée pour évaluer la BPE de chaque connexion de VoIP ou de vidéo. La capacité du lien fixe, 11 Mbps pour 802.11b et 54 Mbps pour 802.11g, ainsi que le nombre maximal de connexions déterminé par simulation permettent l'évaluation de cette valeur. Le Tableau 6.3 présente les valeurs de la BPE (en Kb/s) du trafic de VoIP pour le CODEC G.711 et les payloads de 10 ms et 20 ms. D'autre part, le Tableau 6.4 présente les valeurs de la BPE du trafic des connexions de vidéo UP et DN. Pour ces deux cas, les résultats obtenus pour les normes 802.11b (11 Mb/s) et 802.11g (54 Mb/s) sont présentés. La BPE des trafics de données CBR sera calculée avec les régions d'admission dans le chapitre suivant, tel que discuté précédemment.

Norme	Débit disp. (Kb/s)	Taille Payload	Nbre Sessions Max	BPE (Kb/s)
802.11b	11000	10 ms	9	1 222
		20 ms	19	579
802.11g	54000	10 ms	68	794
		20 ms	122	443

TAB. 6.3 BPE (bits/sec) des trafics VoIP

Le processus de contention de la couche MAC des réseaux WLANs réduit significativement la performance de ces réseaux en admettant un faible nombre de sources VoIP

Norme	Débit Disponible (Kb/s)	Connexions UP		Connexions DN	
		Nbre Sessions Max	BPE (Kb/s)	Nbre Sessions Max	BPE (Kb/s)
802.11b	11000	12	916.66	12	916.66
802.11g	54000	61	885.24	79	683.54

TAB. 6.4 BPE (bits/sec) des trafics Vidéo

et de sources vidéo. Ceci a pour conséquence que les valeurs de BPE pour chacune de ces classes de trafic sont très grandes. Par exemple, le débit moyen d'une source de VoIP est 25.5 Kbps tandis que la valeur de sa BPE dépasse les 1200 Kbps. Dans les réseaux filaires, c'est la bande passante du canal qui est le facteur limitatif. La BPE ne peut donc être plus grande que le débit maximum de la source. Dans les réseaux sans fil, c'est le protocole de la couche MAC qui est le facteur limitatif, ce qui explique que la BPE est largement supérieure au débit maximum de la source. D'autre part, le deuxième responsable des faibles performances des WLANs est le goulot d'étranglement dans l'AP pour la VoIP provoqué par le fait que celui-ci doit transmettre tous les flots descendants sans aucune priorité d'accès au médium. Finalement, on constate que le meilleur multiplexage statistique avec un plus grand nombre des sources dans les réseaux 802.11g permet d'améliorer la valeur de la BPE de chaque source.

CHAPITRE 7

UTILISATION DE LA BPE POUR LE CONTRÔLE D'ADMISSION

La notion de *BPE* d'une classe de trafic définie au Chapitre 6 sera utilisée pour mettre en oeuvre un mécanisme de **Contrôle d'Admission de Connexions** pour les WLANs 802.11. Ce chapitre a pour but de répondre à la question suivante : est-ce qu'on peut utiliser des régions d'admission linéaires pour faire du contrôle d'admission dans les réseaux WLANs 802.11b/802.11g ? Pour répondre à cette question, la Section 7.1 présente tous les paramètres considérés par les simulations ; la Section 7.2 décrit la procédure utilisée pour déterminer les régions d'admission réelles et la Section 7.6 présente les régions d'admission expérimentales obtenues. Les approximations linéaires utilisées pour développer le mécanisme de CAC sont aussi mises en évidence dans cette dernière section. Finalement, la Section 7.5 présente l'impact des nouvelles propositions de différenciation des services (i.e, standard 802.11e) sur les régions d'admission.

7.1 Liste des paramètres considérés pour les simulations

Il faut considérer différentes caractéristiques de chaque classe de trafic pour effectuer les simulations : la taille des paquets, l'intervalle de paquetisation, le taux de transmission de la source ou la direction du flot, ascendant ou descendant. L'impact de chacun de ces paramètres sur les régions d'admissions des réseaux WLANs 802.11b et 802.11g est évalué dans ce projet. Les études réalisées sont les suivantes :

1. Paramètres du trafic VoIP

- CODEC G.711
- Intervalles de paquetisation de 10 et 20 ms

2. Paramètres du trafic vidéo

- Direction des flots : ascendante ou descendante

3. Paramètres du trafic de données

- Tailles de paquets : 100, 500, 1000 et 1440 Bytes
- Taux de transmission de la source : 128 Kbps, 512 Kbps, 1 Mbps, 2 Mbps et 4 Mbps
- Direction des flots : ascendante ou descendante

Toutes ces caractéristiques des classes de trafic peuvent influencer la Bande Passante Effective et la performance des réseaux WLAN. Puisque on fait une recherche exhaustive de l'effet de chaque paramètre, on présente uniquement les résultats les plus importants dans l'évaluation des régions d'admission.

7.2 Procédure pour évaluer les Régions d'Admission réelles

Selon la définition présentée dans la Section 6.1, la région d'admission réelle ou exacte est l'ensemble des points du plan (N_1, N_2, \dots, N_I) pour lequel les critères de QoS des toutes les classes de trafic sont respectés. Il est à noter que N_i est le nombre de sessions admises pour la classe de trafic i . Si par exemple, seulement deux classes de trafic sont considérées pour les simulations alors les étapes à suivre pour déterminer une région d'admission réelle sont :

1. Détermination du nombre maximal de sessions N_1 d'un seul trafic (VoIP ou vidéo), par exemple qui n'atteignent pas les limites de QoS. Le premier couple de points du plan est donc $(N_1, 0)$. À noter que le premier trafic doit toujours être une application avec des contraintes de QoS.
2. Introduction dans le système d'une source du deuxième trafic et évaluation de son influence dans la performance des réseaux WLANs. Dans cette étude, on y calcule le nouveau couple de points (N_1, N_2) dans lequel N_2 est égal à 1 et N_1 est le

nombre maximal de sources du premier trafic pour lequel les contraintes des 2 classes de trafic sont encore respectées.

3. Répétition de processus décrit au point 2 en incrémentant le nombre de sessions N_2 . Pour chaque augmentation, les simulations déterminent le nouveau couple de points (N_1, N_2) qui respectent les contraintes de QoS.
4. La procédure s'arrête quand $N_1 = 0$.

La même procédure est utilisée quand les trois trafics (N_1, N_2, N_3) sont présents dans le réseau : le script de simulation introduit une source de chaque trafic (N_2, N_3) au point 2 de la procédure et évalue le nombre maximal de connexions du premier trafic (N_1) .

7.3 Régions d'admission réelles obtenues par simulation

Dans cette section, les régions d'admission réelles obtenues par simulation sont présentées. Les combinaisons de deux classes de trafics qui ont été analysées par les simulations sont les suivantes : VoIP + CBR, Vidéo + CBR et finalement Vidéo + VoIP. Chaque simulation a été répétée 10 fois tel que mentionné dans la Section 4.3.2. Pour chaque région d'admission, le nombre minimal de connexions obtenu de ces 10 répétitions sera utilisé afin de réduire la probabilité que le réseau réel ne dépasse les limites des contraintes de QoS. Cependant, ceci diminue la capacité du réseau.

7.3.1 Régions d'admission réelle pour la VoIP + CBR

Les régions d'admission réalisées en présence des flots de VoIP et des flots CBR vont montrer l'influence des paramètres du trafic de données CBR, taux de transmission, taille des paquets, et direction des flots, et ceux des trafics de VoIP (payload de 10 ms et 20 ms pour le CODEC G.711) déjà mentionnées dans la Section 7.1.

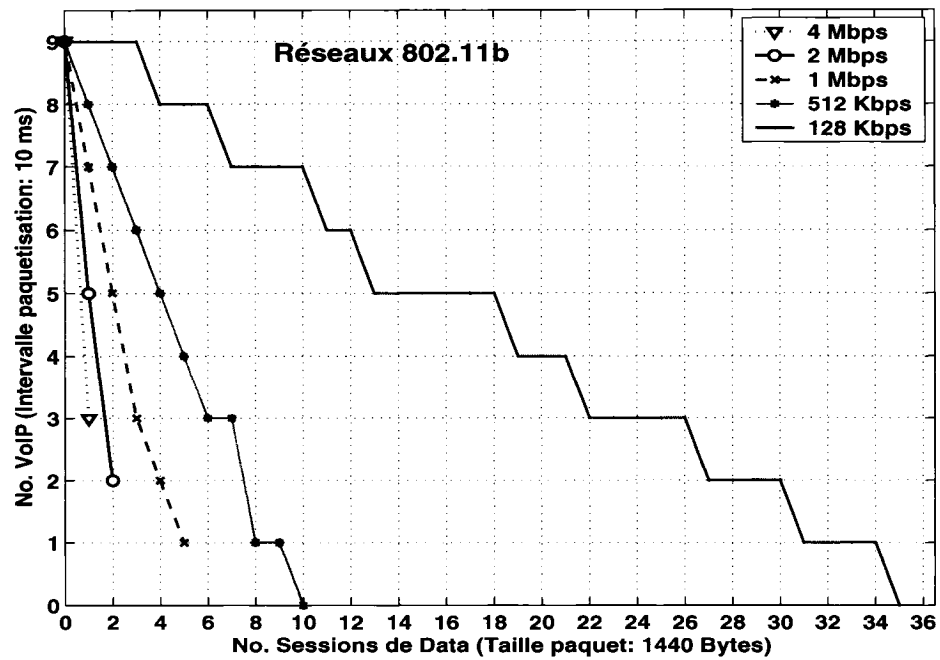
1.- Variation du taux de transmission des sources CBR :

Les Figures 7.1(a) et 7.1(b) montrent des exemples des régions d'admission de sources de VoIP en présence des sources CBR pour les réseaux 802.11b et 802.11g respectivement. Dans ces deux cas, l'intervalle de paquetisation des sources de VoIP a été fixé à 10 ms et la taille de chaque paquet CBR a été fixée à 1440 Bytes. Les figures montrent les différentes régions obtenues en variant le débit de la source de données.

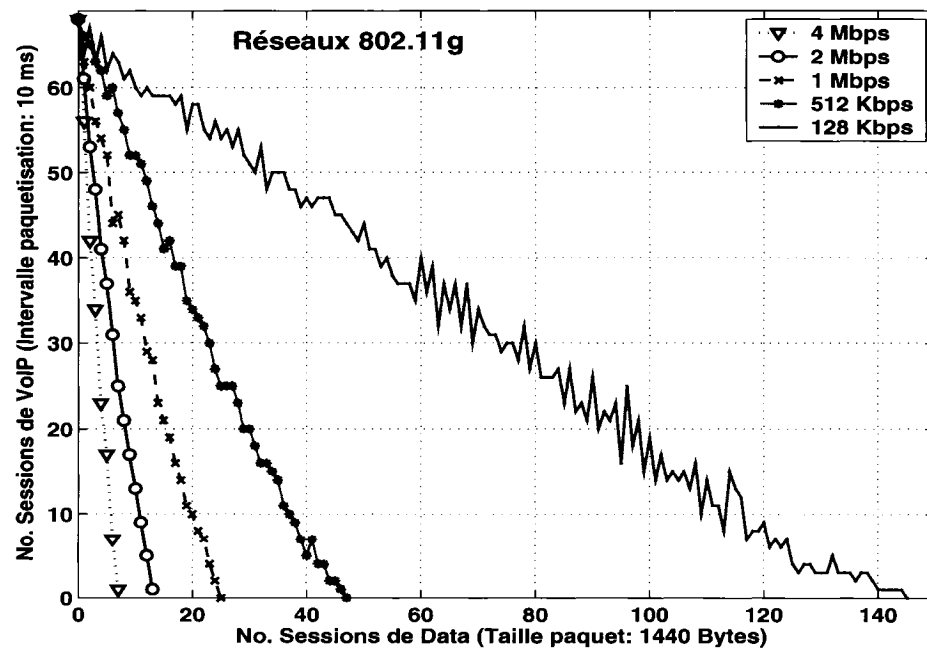
Dans ces deux exemples, on constate que le nombre de sources de VoIP est une fonction linéaire du nombre de sessions de données. À noter que la limite supérieure de 2 secondes du délai moyen pour les flots de données, établie dans la Section 3.2.3, permet d'éviter des situations où les queues des tampons des STAs de données et de l'AP deviennent surchargées. D'autre part, cette limite explique le fait que certaines régions d'admission ne croisent pas l'axe des abscisses car le système devient instable. Finalement, on constate une augmentation substantielle du nombre de connexions de VoIP et CBR admises dans les réseaux 802.11g face au nombre de connexion admises dans les réseaux 802.11b. Cette meilleure capacité du système est obtenue grâce à une bande passante plus grande et au multiplexage statistique réalisé entre les sources de VoIP ON/OFF et de CBR dans un canal de 54 Mbps (802.11g) au lieu d'un canal de 11 Mbps (802.11b). Les régions obtenues à partir des simulations où la taille de paquets des sources CBR est fixé à 1024 Bytes, 500 Bytes et 100 Bytes pour les réseaux 802.11b et 802.11g se trouvent dans l'Annexe VI.

2.- Variation de la taille des paquets des sources CBR :

Pour évaluer l'impact de la taille des paquets CBR, les régions d'admission des sources de VoIP en présence des sources CBR UP sont tracées, en fixant le débit CBR. Par exemple, la Figure 7.2 montre les différentes courbes des régions d'admission en fonction des différentes tailles de paquets CBR sur la performance du réseau sans fil 802.11g.



(a) Régions d'admission VoIP+CBR dans les 802.11b



(b) Régions d'admission VoIP+CBR dans les 802.11g

FIG. 7.1 Régions d'admission VoIP (payload : 10 ms) + CBR (1440 Bytes)

Dans cet exemple, le débit des sources CBR a été fixé à 128 Kbps. Les régions obtenues à partir des simulations où le débit des sources CBR est fixé à 512 Kbps, 1 Mbps, 2 Mbps et 4 Mbps pour les réseaux 802.11b et 802.11g se trouvent dans l'Annexe VII.

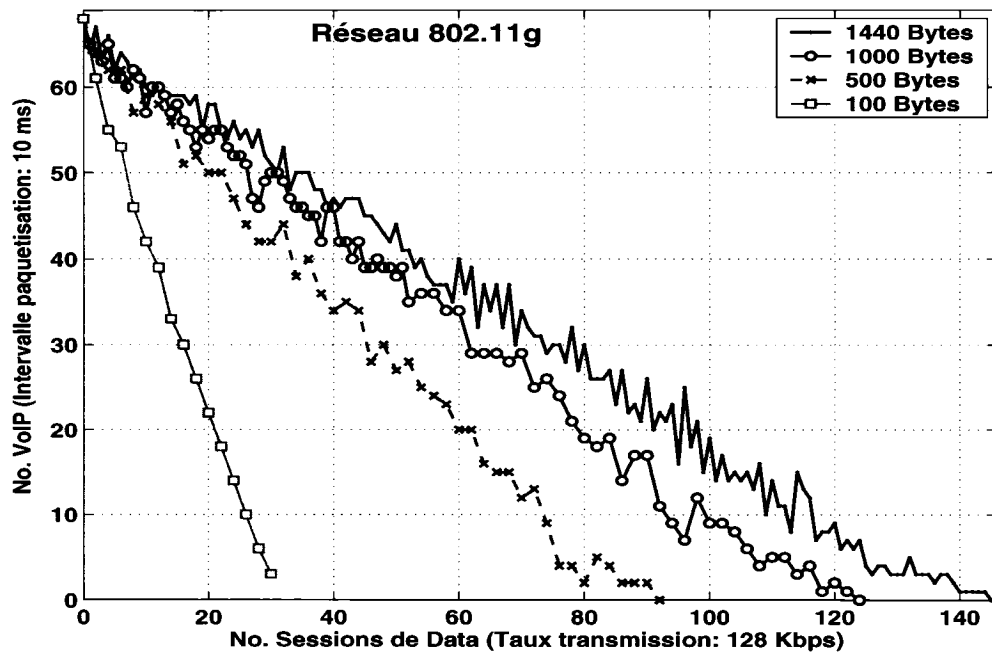


FIG. 7.2 Régions d'admission VoIP (payload : 10 ms) + CBR (débit : 128 Kbps)

On observe que les réseaux sans fil WLANs ont toujours une meilleure performance lorsque les sources CBR génèrent de grands paquets. Cette conclusion est la même que celle obtenue par les résultats des simulations en présence de trafics de VoIP uniquement. Aucune source de petits paquets (i.e 100 Bytes) et avec un débit supérieur à 1 Mbps n'est supporté par les réseaux 802.11b (Annexe VII). Ce comportement, qui ne se manifeste pas dans les réseaux câblés, est une conséquence du fonctionnement du mécanisme d'accès avec contention de la couche MAC. Tel qu'expliqué précédemment, le processus d'overhead a un impact relatif plus important pour les petits paquets CBR transmis et cela a comme conséquence une diminution de la performance du réseau. Par la suite, pour simplifier l'analyse, les régions d'admission de VoIP et des données CBR sont présentées en utilisant les caractéristiques suivantes : une taille de paquet fixe de 1440 Bytes

et un débit constant de 128 Kbps. Ces paramètres ont été choisis pour réaliser des évaluations dans les courbes avec la meilleure performance du réseau WLAN. Cependant, nous reviendrons sur l'influence du débit de transmission et de la taille des paquets dans la Section 7.4.

3.- Impact de la direction (UP/DN) des flots de DATA

Tel que mentionné dans la Section 4.2, le lien dans les réseaux sans fil est asymétrique puisque les flots ascendants et des flots descendants entre les stations et l'AP n'ont pas la même influence sur la QoS. Cette étude cherche donc à établir quelle est l'influence de la direction des sources CBR sur les régions d'admission des sources de VoIP (10 ms d'intervalle de paquetisation). La Figure 7.3 montre cet impact dans les réseaux 802.11b et 802.11g.

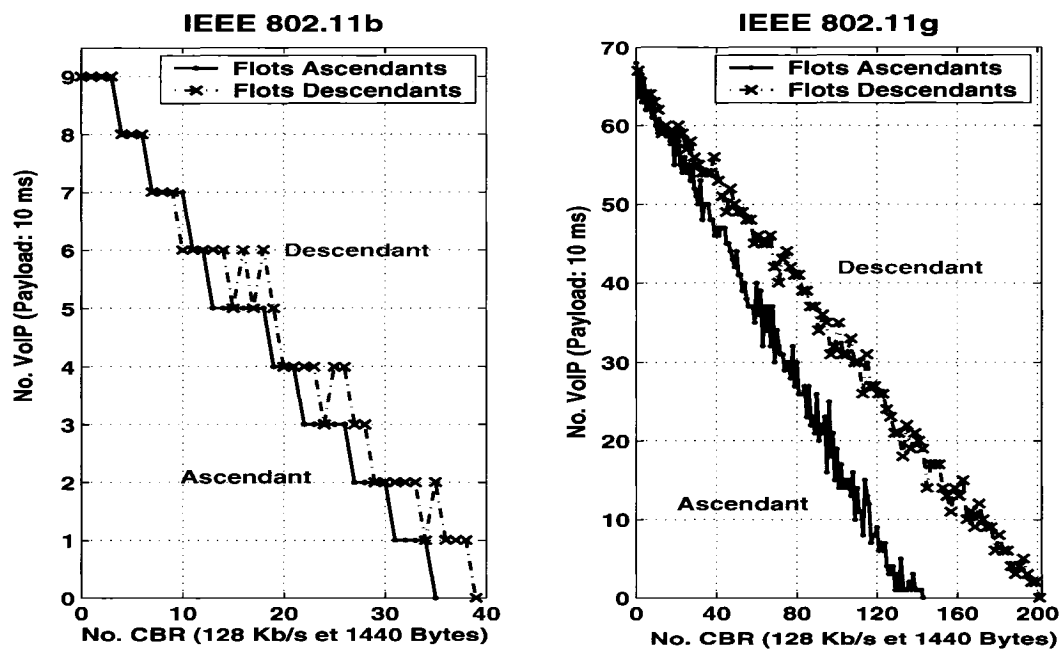


FIG. 7.3 Impact de la direction (UP/DN) des sources CBR

Dans ces deux cas (802.11b et 802.11g), la région d'admission avec des liens descendants de données est plus grande qu'avec des liens ascendants. On peut constater que

dans les réseaux WLANs 802.11, le lien descendant forme toujours un goulot d'étranglement qui limite le nombre de connexions maximales dans le réseau par rapport aux critères de QoS. Malgré cela, l'opération de contention de la couche MAC est à l'origine des pertes importantes d'efficacité en fonction du nombre additionnel de stations de données qui se trouvent en contention pour l'accès au médium. Dans les cas où les sources CBR se trouvent en mode descendant, il existe moins des stations qui se trouvent en contention et donc, la performance et l'efficacité du réseau sans fil sont meilleures.

D'autre part, les analyses sur l'impact des tailles de paquets montrent que ce paramètre est essentiel pour améliorer la performance des réseaux sans fil. Cependant, si la taille des paquets dépassent les 1000 Bytes, les régions d'admission ont des formes similaires (Figure 7.4). En effet, cette dernière figure suggère une performance similaire en présence des sources CBR de 1440 Bytes et 1024 Bytes. Les régions d'admission obtenues pour les autres débits de sources et pour les réseaux 802.11b et 802.11g se trouvent dans l'Annexe VIII.

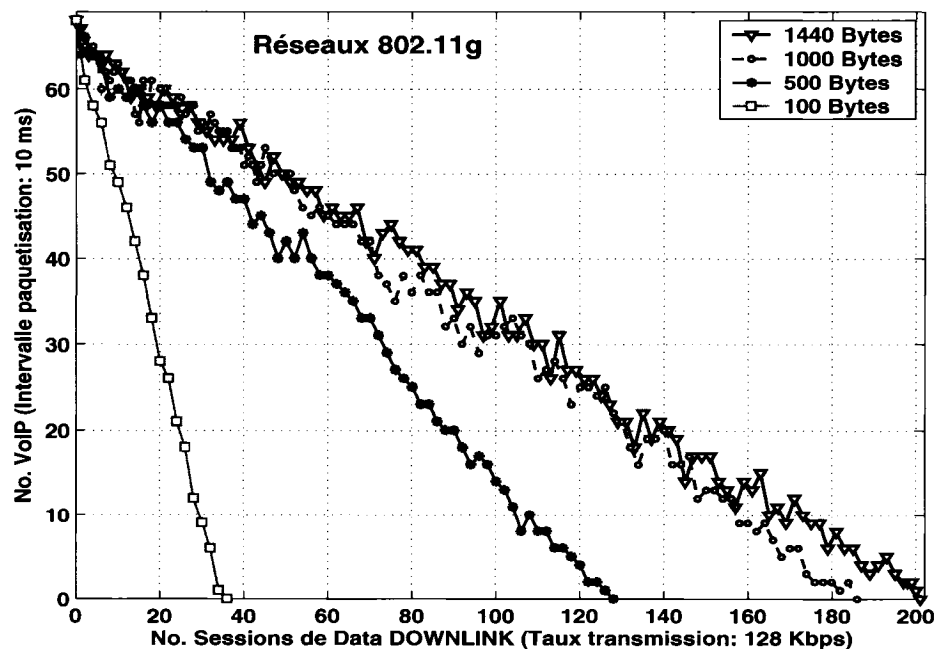


FIG. 7.4 Régions d'admission VoIP (payload : 10 ms) + CBR DN (débit : 128 Kbps)

4.- Influence de l'intervalle de paquetisation de la VoIP

La dernière caractéristique mise en évidence dans l'étude des régions d'admission en présence de flots de VoIP et de flots CBR est celle de l'intervalle de paquetisation du CODEC pour les flots de VoIP. Pour cette évaluation, des simulations avec des sources de VoIP sont réalisées en changeant l'intervalle de paquetisation de 10 ms à 20 ms. La Figure 7.5 présente les régions d'admission des sources VoIP (10 ms/20 ms) et des sources CBR dans les réseaux 802.11b et 802.11g. Les flots CBR choisis ont des paquets de 1440 Bytes et un débit de source de 128 Kbps.

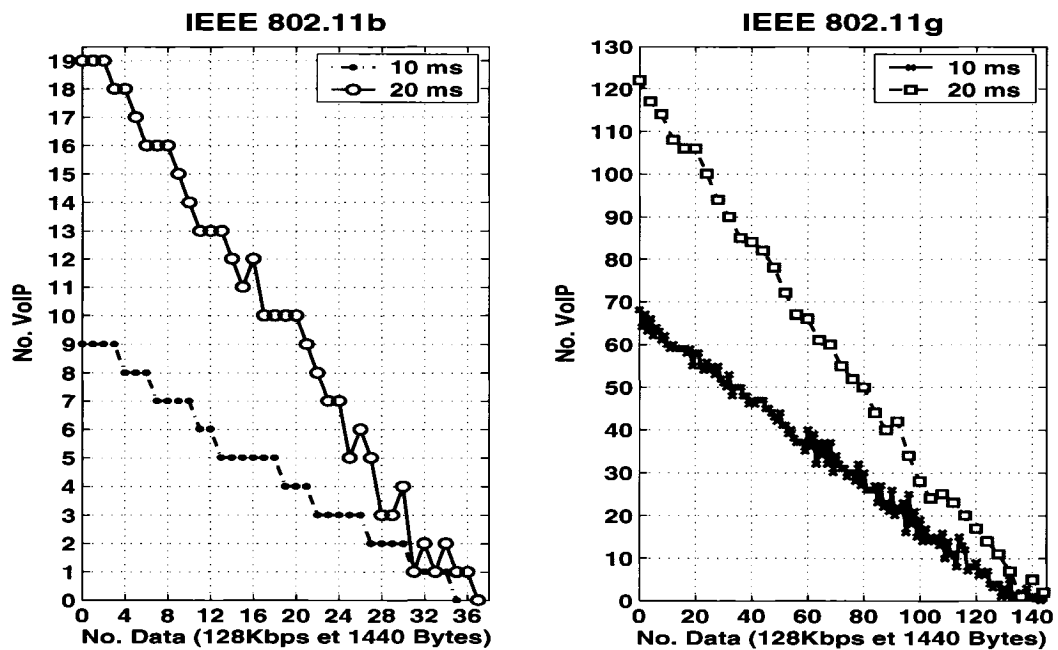


FIG. 7.5 Impact de l'intervalle de paquetisation de la VoIP (payloads : 10 ms et 20 ms)

Avec le changement de l'intervalle de paquetisation des flots de VoIP, les régions d'admission ont maintenu leur linéarité. Tel qu'illustré dans la Figure 7.5, la pente de la région d'admission *linéaire* varie en fonction de l'intervalle de paquetisation et est fonction du nombre maximal de sessions VoIP qui peuvent être admises (voir Tableau 6.1).

De plus, l'intersection des courbes avec l'axe des abscisses, c'est-à-dire le nombre de sessions de données admises, ne varie pas en fonction de l'intervalle de paquetisation.

7.3.2 Régions d'admission réelle pour la Vidéo + CBR

Cette section présente une analyse des régions d'admission obtenues en remplaçant le trafic de VoIP par des sources vidéo. Les simulations avec les sources vidéo ne considèrent que les sources CBR en mode ascendant avec un débit de transmission de 128 Kbps. Une analyse de l'effet de la taille des paquets CBR sur les régions d'admissions de sources vidéo en mode ascendante/descendante est aussi présentée.

Les Figures 7.6 et 7.7 illustrent les régions d'admission obtenues à partir de la transmission des sources vidéo en mode ascendant. On constate tout d'abord que la linéarité des courbes est maintenue. De plus, la raison de l'overhead de contention, les régions d'admission sont supérieures en présence des sources de données transmettant de grands paquets. Ce résultat est similaire à celui obtenu pour les régions d'admission de la VoIP+CBR.

Les Figures 7.8 et 7.9 montrent les régions d'admission obtenues pour des sources vidéo descendantes. On peut remarquer que les régions d'admissions perdent légèrement leur linéarité en fonction de la taille de paquets des sources CBR et deviennent concaves en présence de paquets CBR de grand taille. Une explication de ce phénomène nécessiterait une étude plus approfondie.

7.3.3 Régions d'admission réelle pour la Vidéo + VoIP

Une étude de la performance des réseaux sans fil 802.11 avec l'analyse du comportement de deux classes de trafic ayant des contraintes de QoS est aussi primordiale. La

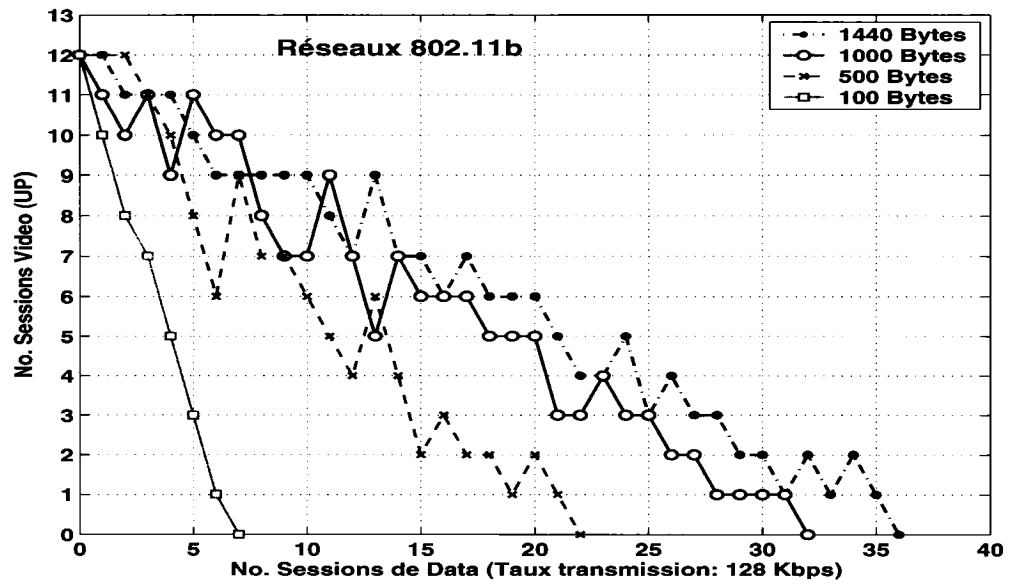


FIG. 7.6 Régions d'admission Vidéo UP + CBR UP pour 802.11b

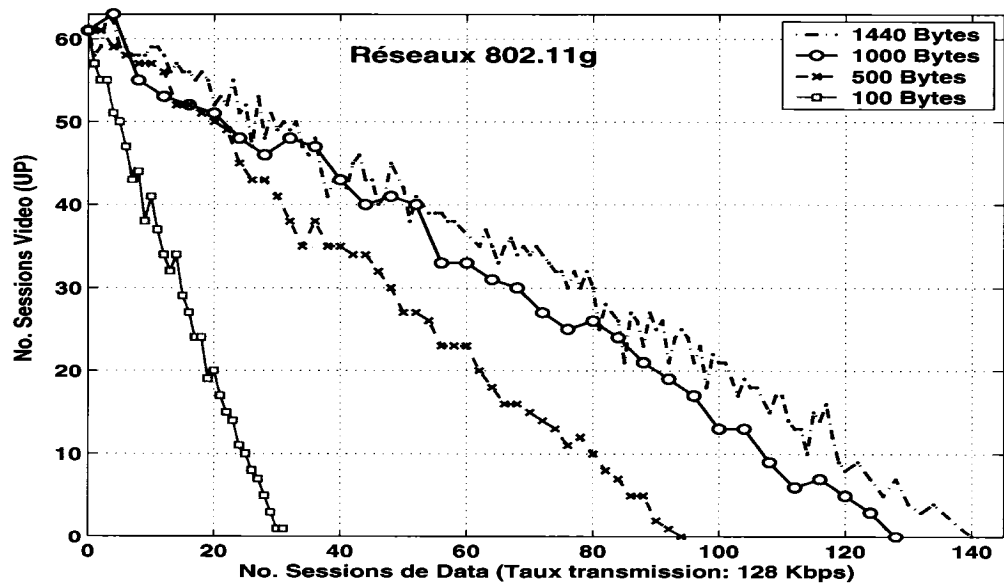


FIG. 7.7 Régions d'admission Vidéo UP + CBR UP pour 802.11g

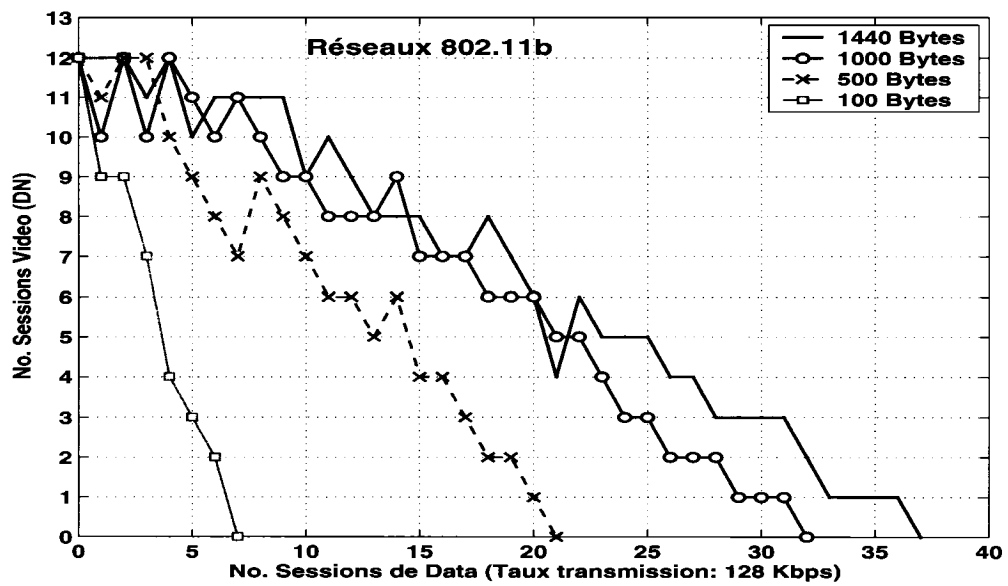


FIG. 7.8 Régions d'admission Vidéo DN + CBR UP pour 802.11b

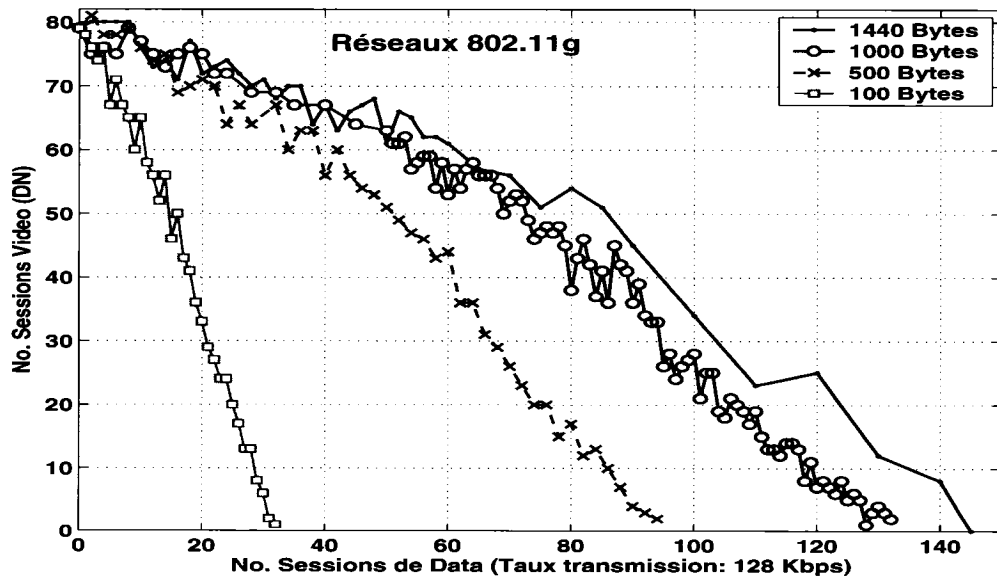


FIG. 7.9 Régions d'admission Vidéo DN + CBR UP pour 802.11g

Figure 7.10 montre les régions d'admission obtenues en présence des sources de vidéo et des sources de VoIP dans les réseaux 802.11b et 802.11g. Pour réaliser cette évaluation, les sources vidéo transmettent soit en mode ascendant ou descendant et les sources de VoIP utilisent un intervalle de paquetisation de 10 ms.

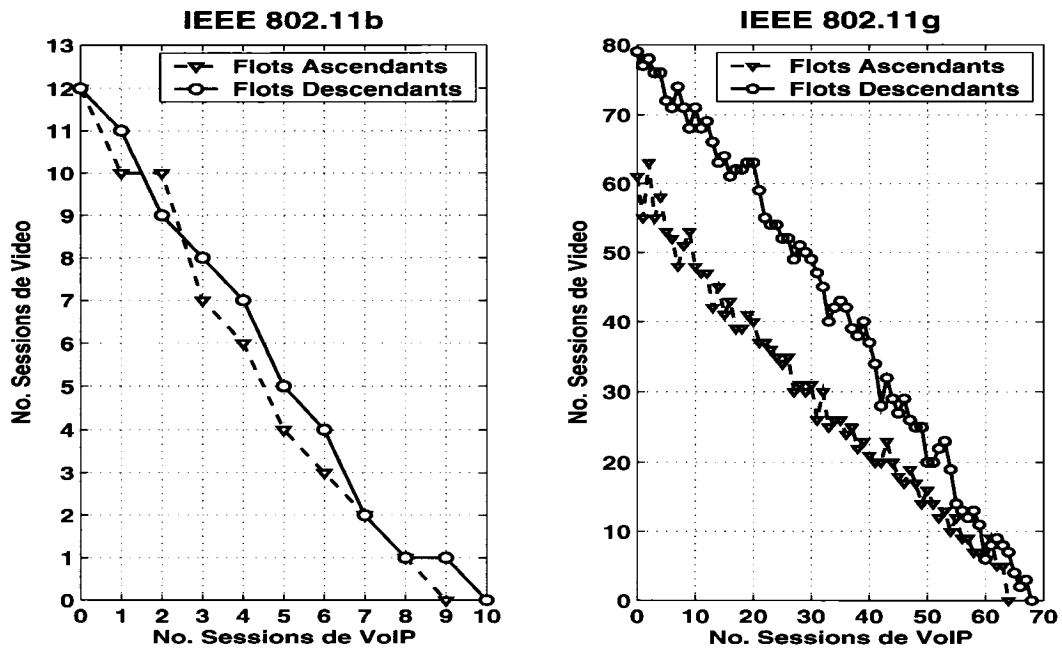


FIG. 7.10 Régions d'admission de Vidéo + VoIP

Les figures précédentes suggèrent que les régions d'admission demeurent linéaires même en présence de deux classes de trafic ayant des contraintes strictes de QoS. Les régions d'admission en présence des sources de vidéo en mode descendante est meilleure qu'en mode ascendante, comme pour les sources CBR. Un nombre plus élevé de stations en contention (de vidéo ou de données) a pour conséquence la diminution de l'efficacité du réseau. Dans ce contexte, on peut conclure que la performance d'un réseau sans fil est toujours meilleure en présence de flots unidirectionnels de n'importe quelle classe de trafic en mode descendant par rapport à un réseau avec plus de flots en mode ascendant puisque dans ce dernier cas il y a plus des stations qui se trouvent en contention pour accéder au médium. Il est aussi important de noter que les intersections des axes des abs-

cisses et des ordonnées correspondent bien aux résultats obtenus avec une seule classe de trafic (Tableaux 6.1 et 6.2).

7.4 Proposition d'un mécanisme de CAC

La linéarité de toutes les régions d'admission ainsi que la cohésion des intersections des régions d'admission avec les axes permet de conclure qu'il est possible de concevoir un algorithme de CAC basé sur les notions de BPE de chaque classe de trafic. La BPE des classes de trafic ayant des contraintes de QoS (vidéo et VoIP) a été calculée dans la Section 6.3 et présentée dans les Tableaux 6.3 et 6.4. Dans cette même section, on a mentionné que la valeur de la BPE des flots CBR sera déterminée en fonction de l'intersection de l'axe des abscisses des régions d'admission présentées dans ce chapitre. Cependant, plusieurs paramètres considérés dans cette étude comme la taille des paquets, le débit de la source et la direction des flots CBR, influencent la valeur d'intersection avec l'axe des abscisses. On obtient environ 40 points d'intersection avec l'axe. Le nombre de classes de trafic à considérer dans l'Équation 6.2 deviendrait alors très grand en raison de tous ces paramètres et il serait difficile de mettre en place un mécanisme de CAC efficace.

Dans le but de réduire le traitement d'au moins un paramètre caractérisant les sources CBR et de trouver un mécanisme de CAC simplifié, une redéfinition de la BPE de chaque source s'avère indispensable. D'autre part, l'étude a montré que le nombre de paquets par seconde envoyé par une source est une valeur critique dans la performance des WLANs en raison de l'overhead de la couche MAC pour chaque transmission de paquet. On suggère donc de caractériser chaque source de chaque classe de trafic i en termes du nombre de paquets par seconde γ_i qu'elle émet. Ce nombre de paquets par seconde est fonction du débit de la source R_{source} en Kbits/sec et de la taille des paquets, soit P

bytes, de cette source et est donné par :

$$\gamma_i = \frac{R_{source}}{8 \times P} \quad \text{paquets/sec} \quad (7.1)$$

Avec cette proposition, les régions d'admission données en termes du nombre de connexions vont être retracées en fonction du nombre de paquets par seconde pour chaque classe de trafic et par conséquent, la BPE de chaque classe de trafic est aussi redéfinie en termes de bits par paquet au lieu de bits par seconde. La nouvelle BPE d'une classe de trafic i , notée θ_i , est donc définie en fonction de la capacité du lien C en Kbits/sec et le nombre maximum de paquets par seconde γ_i^* de la classe i (Formule 7.2).

$$\theta_i = C / \gamma_i^* \quad \text{Kbits/paquet} \quad (7.2)$$

La BPE θ_i indique donc le nombre de bits de capacité du lien requis pour transmettre un paquet de la classe de trafic i . À noter que notre redéfinition implique un changement des unités de la BPE définie par l'Équation 6.1 par l'équation suivante :

$$\theta_i = W_i / \gamma_i \quad \text{Kbits/paquet} \quad (7.3)$$

7.4.1 Redéfinition des régions d'admission de VoIP + CBR

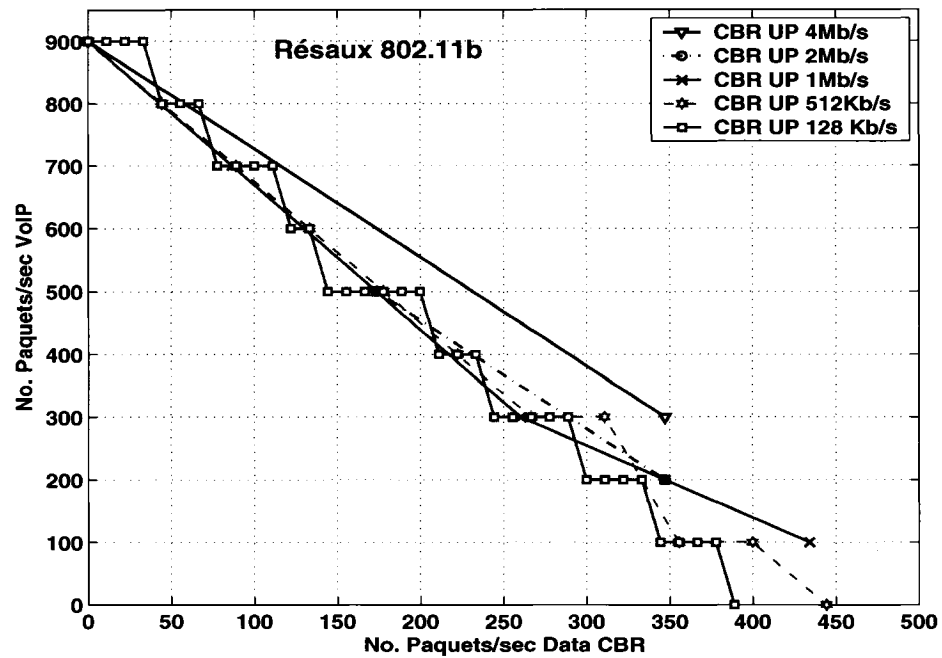
Les régions d'admission de la VoIP avec des sources CBR présentées dans les Figures 7.1(a) et 7.1(b) sont recalculées en termes de paquets par seconde et deviennent les Figure 7.11(a) et Figure 7.11(b), respectivement. En fixant la taille des paquets CBR, cette redéfinition suggère que les régions d'admission des flots de VoIP en présence de flots CBR ont un comportement similaire peu importe le débit de la source CBR. Il est à noter qu'une seule courbe dans la Figure 7.11(b) est un peu éloignée du comportement commun des autres régions d'admission. Ceci découle de la grande quantité de sources

CBR de 128 Kbps (plus de 140 sources, voir Figure 7.1(b)) dans les réseaux 802.11g, où le débit du canal est égale à 54 Mbps, ce qui crée une quantité importante de collisions comparé aux autres configurations.

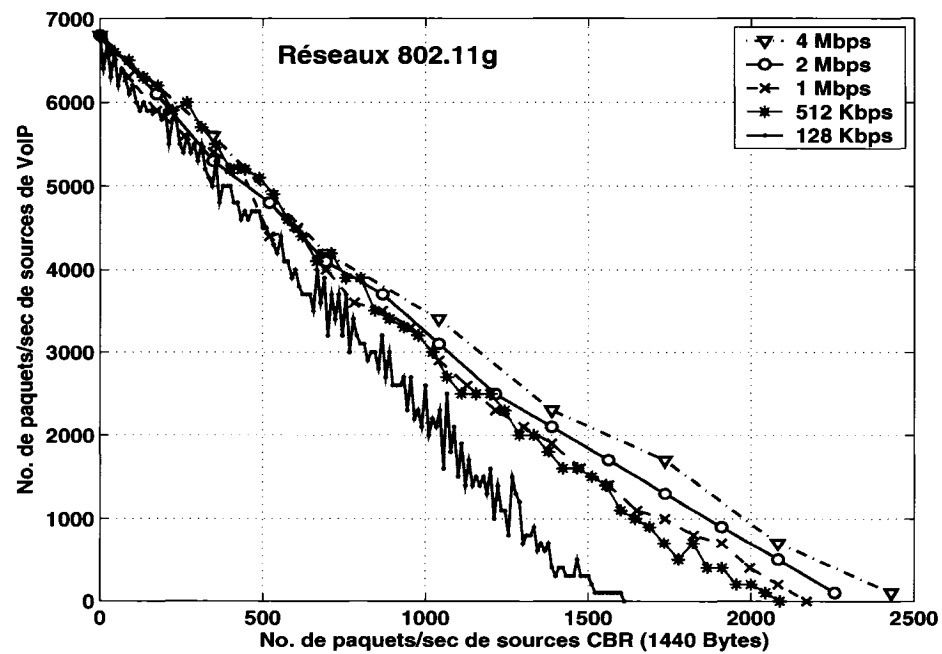
Avec ces nouvelles définitions, les régions d'admission des sources de VoIP avec des intervalles de paquetisation de 10 ms et 20 ms ainsi que les régions d'admission des sources CBR ascendantes et descendantes sont aussi semblables. Par exemple, les Figures 7.12 présentent les régions d'admission suivantes : deux régions d'admission avec des flots CBR ascendants déjà montrées par les Figures 7.11, une avec des flots CBR descendants et une autre avec les sources de VoIP de 20 ms d'audio. Un simple changement d'unités dans les régions d'admission ainsi que la redéfinition de la BPE ont donc permis d'éliminer l'influence des paramètres suivants : la direction des flots CBR, le débit des sources CBR et l'intervalle de paquetisation des flots de VoIP.

Les régions d'admission en présence des sources CBR utilisées par la suite dans cette étude sera celle des sources CBR de débit de 128 Kbps en mode ascendant. Ce choix est utilisée parce que cette région d'admission est toujours légèrement inférieure aux autres et garantit donc que tous les critères de QoS du réseau sans fil vont être respectés pour les autres régions d'admission. Cependant, les régions d'admission dépendent encore de la taille des paquets, comme le montre la Figure 7.13 pour les réseaux WLANs 802.11g, puisque l'overhead relatif de la couche MAC dépend de la taille du paquet.

Étude théorique du nombre maximal de paquets par seconde CBR.- Une analyse théorique de la valeur limite du nombre de paquets par seconde admise par les sources CBR dans le réseaux WLAN 802.11b et 802.11g permet de valider les résultats obtenus par les simulations. Le nombre maximal de paquets par seconde des flots CBR, noté γ_{max}^t , est égal à la valeur inverse du temps total pris pour une transmission d'un paquet CBR, soit la somme du temps pris pour transmettre P Bytes (t_P), calculé par l'Équation 5.1, plus le temps d'overhead ($t_{overhead}$) pour transmettre ce paquet :

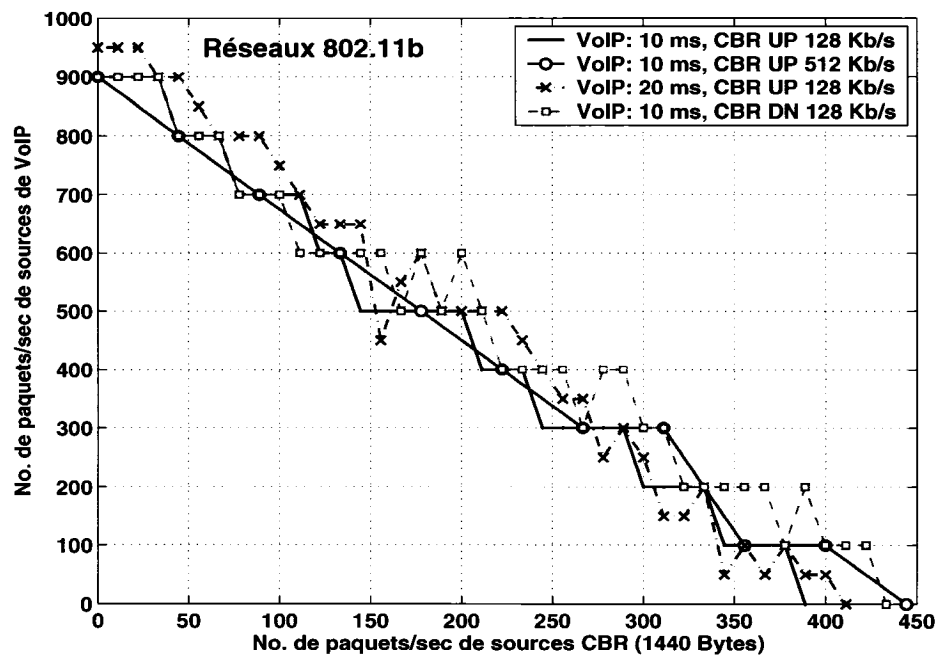


(a) Régions d'admission redéfinies pour les réseaux 802.11b

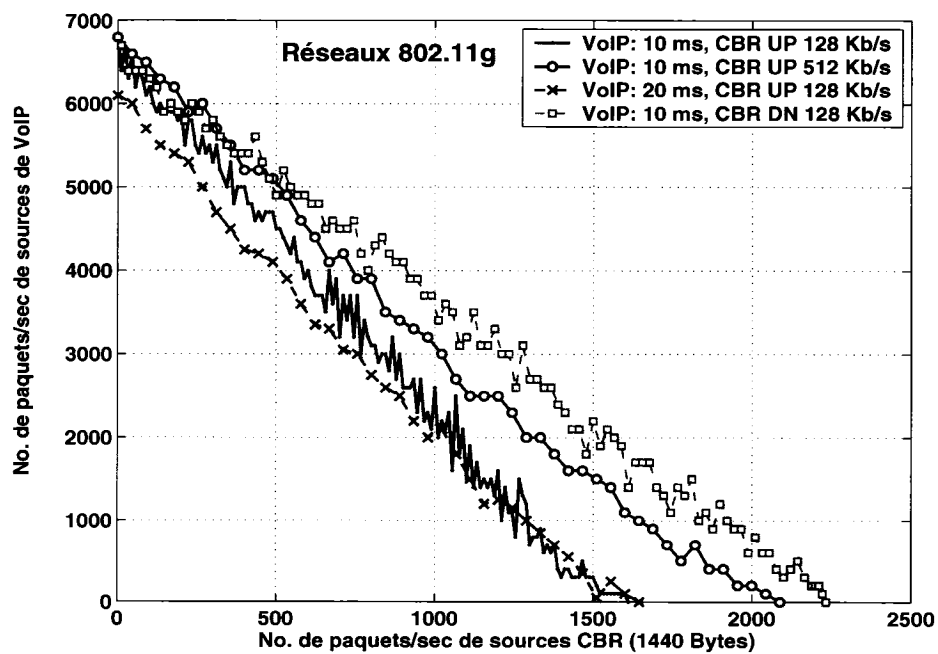


(b) Régions d'admission redéfinies pour les réseaux 802.11g

FIG. 7.11 Régions d'admission en termes de paquets par seconde



(a) Régions d'admission redéfinies pour les réseaux 802.11b



(b) Régions d'admission redéfinies pour les réseaux 802.11g

FIG. 7.12 Comportement similaire pour les régions d'admission

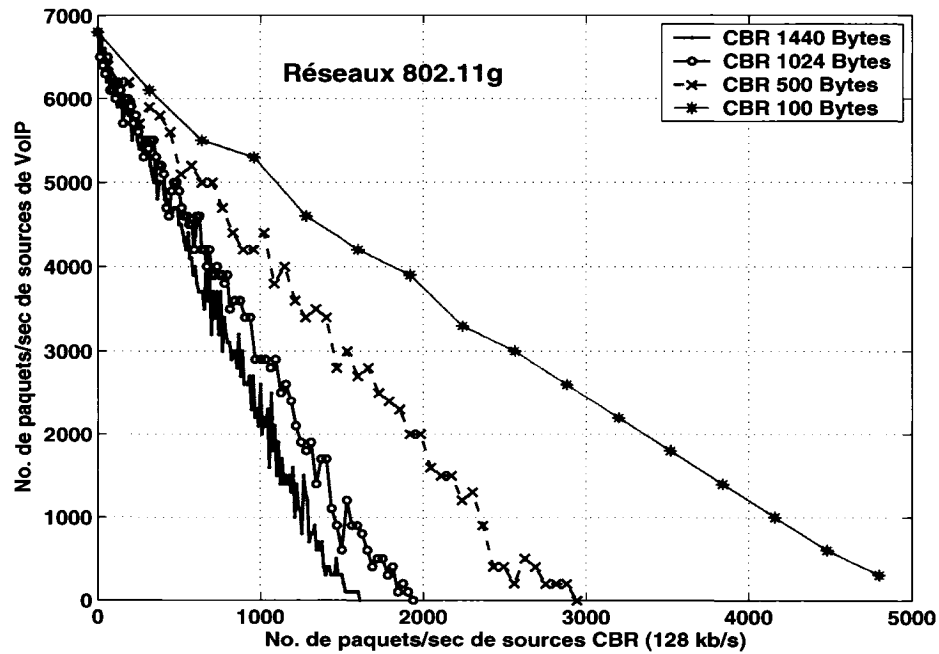


FIG. 7.13 Régions d'admission (paquets/sec) en fonction de la taille des paquets CBR

$$\gamma_{max}^t = \frac{1}{t_P + t_{overhead}} \quad (7.4)$$

Dans cette analyse, le temps d'overhead pour transmettre chaque paquet CBR est récrit dans la Section 5.2. Ce temps d'overhead dépend du nombre d'utilisateurs dans le réseau sans fil et donc de la probabilité de collisions. Pour simplifier l'analyse, une probabilité de collision nulle est utilisée car cette probabilité est très faible dans les réseaux en mode d'infrastructure [19, 22, 23]. Le Tableau 7.1 présente le nombre maximal de paquets par seconde CBR (γ_{max}^t) obtenus théoriquement par cette analyse ainsi que le nombre maximal de paquets par seconde CBR (γ_{max}^e) obtenu expérimentalement par les simulations. Les valeurs expérimentales sont montrées par la Figure 7.11(b) et par les figures de l'Annexe IX.

Taille des paquets	802.11b		802.11g	
	γ_{max}^t	γ_{max}^e	γ_{max}^t	γ_{max}^e
1440 B	512.23	450	2599.7	2500
1024 B	607.605	550	3096.1	2800
500 B	790.0	760	4075.65	4000
100 B	1027.12	1100	5373	6100

TAB. 7.1 Nombre maximal théorique de paquets/seconde CBR dans les WLANs 802.11

Par exemple, la valeur maximale théorique obtenue pour les sources CBR de 1440 Bytes pour un réseau 802.11g est égale à 2599 paquets/sec. Ce qui correspond relativement bien à la limite supérieure expérimentale des régions d'admission présentée dans la Figure 7.11(b). Néanmoins, le nombre de paquets/sec obtenu expérimentalement, c'est-à-dire l'abscisse de la région d'admission, pour les sources de débit de 128 Kbps s'éloigne de la valeur théorique calculée. La formation de ce deuxième groupe est expliquée par les trois raisons suivantes :

1. Les abscisses des régions d'admission montrent les points exacts où le réseau n'est plus capable d'offrir de la QoS aux sources de VoIP mais le réseau pourrait supporter des sources CBR additionnelles sans la présence des flots de VoIP.
2. Tel que mentionné auparavant, l'efficacité du réseau se voit réduite en présence des sources CBR en mode ascendant, dû au nombre de collisions plus élevé. C'est pour cette raison que les abscisses des régions d'admission des flots de VoIP en présence des sources CBR en mode descendant s'approchent mieux des valeurs théoriques, où on a négligé la probabilité de collision. La Figure 7.14 illustre cette observation en présentant les régions d'admission avec des sources CBR DN de taille de paquets de 1440 Bytes. De plus, on constate que les régions d'admission des sources en mode descendant se rapprochent beaucoup entre elles.
3. L'utilisation de l'approximation d'une probabilité de collision nulle dans ce réseau n'est plus valable en présence d'une grande quantité de sources ascendantes

comme c'est le cas de toutes les régions d'admission en présence des sources CBR de débit de 128 Kbps.

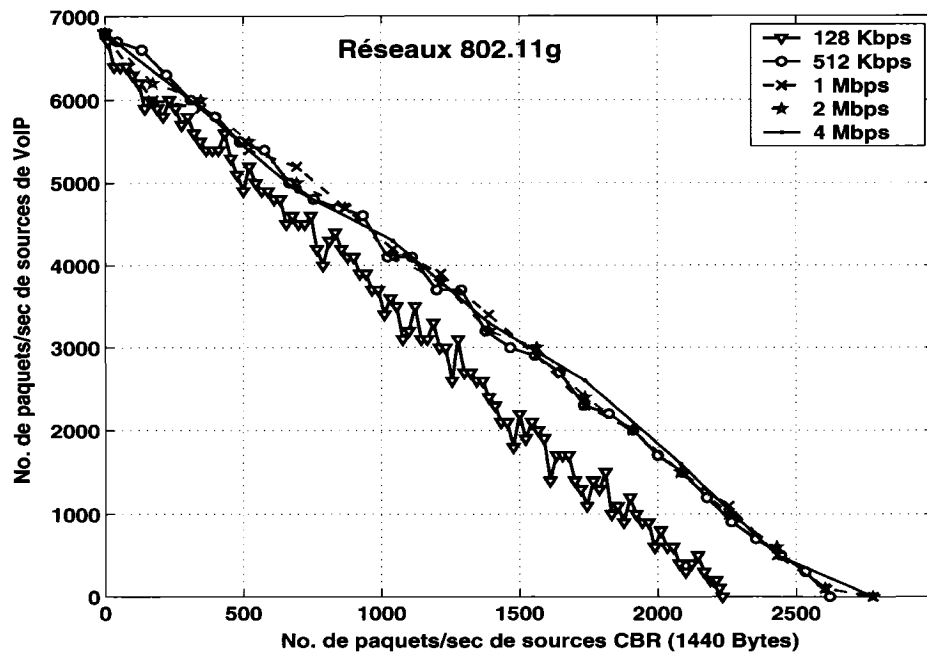


FIG. 7.14 Impact des sources en mode descendant pour réseaux 802.11g

7.4.2 Redéfinition des régions d'admission en présence des sources vidéo

La redéfinition des régions d'admission en termes de paquets/seconde permet d'éliminer le traitement de certains paramètres des sources CBR et des sources de VoIP tel que mentionné dans la section précédente. Cependant, cette redéfinition ne simplifie pas la caractérisation des flots vidéo puisqu'on ne réussit pas à éliminer le traitement d'aucune de caractéristiques vidéo. De plus, la forme des régions d'admission en présence des sources vidéo n'est pas modifiée avec cette redéfinition. Par exemple, on obtient la Figure 7.15 si on retrace les régions d'admission des sources vidéo en présence des sources VoIP présentées dans la Figure 7.10. On constate que la seule différence entre ces deux figures est au niveau des unités de l'axe où se trouvent les sources vidéo : elles sont

multipliées par un facteur de 25. Ce facteur représente la valeur moyenne des paquets par seconde qu'une source vidéo transmet, tel que mentionné dans la Section 3.1.2.

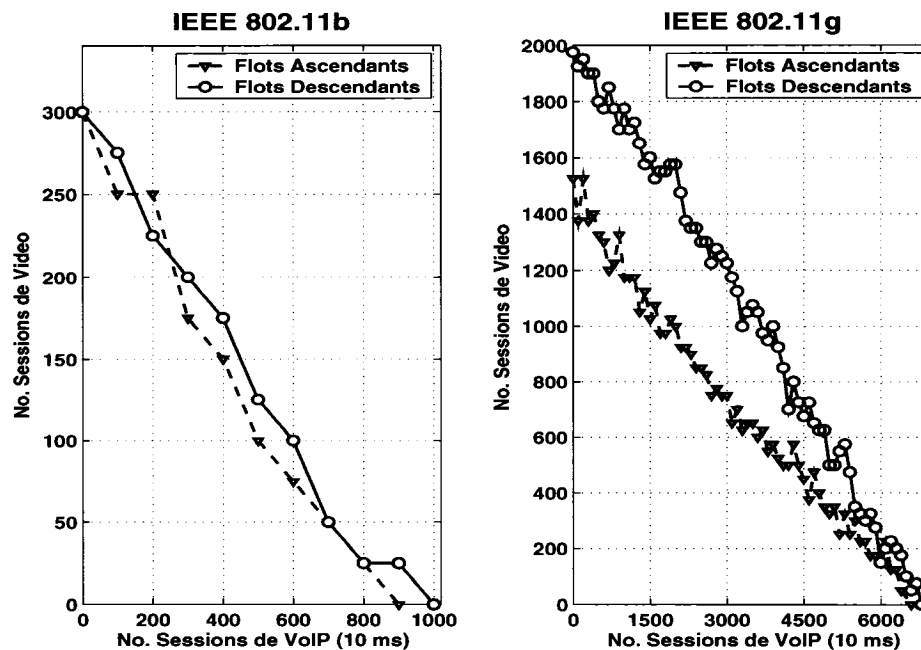


FIG. 7.15 Redéfinition des régions d'admission en présence des sources vidéo

Avec cette redéfinition, toutes les régions d'admission des sources vidéo en présence des sources CBR (Figures 7.6, 7.7, 7.8, 7.9) ainsi que celles en présence des sources VoIP (Figure 7.10) verront les axes vidéo multipliés par 25.

7.4.3 Valeurs de BPE utilisées par le mécanisme de CAC

Il est nécessaire d'établir la valeur de la BPE de chaque classe de trafic en termes de bits par paquet pour réaliser le mécanisme de CAC simplifié. La Formule 7.2 permet de calculer la BPE (bits/paquet) de chaque source de trafic en fonction de son nombre maximal de paquets par seconde supporté par le système sans fil 802.11b/g. Notre étude établit par simulations ce nombre maximal de paquets par seconde de chaque classe de trafic qui correspond aux intersections des régions d'admission avec les axes du plan.

Pour chacune des 3 classes de trafic, les paramètres de la source influençant la BPE sont les suivants :

- Classe de trafic 1 : VoIP
 - Aucun paramètre
- Classe de trafic 2 : Vidéo
 - Direction des flots : mode ascendant ou mode descendant
- Classe de trafic 3 : Données CBR avec débit de source de 128 Kb/s.
 - Taille de paquet : 1440 Bytes, 1024 Bytes, 500 Bytes ou 100 Bytes

Le Tableau 7.2 récapitule le nombre maximal de paquets par seconde obtenu par simulation de chaque classe de trafic ainsi que leurs valeurs de la BPE (θ_i) calculées avec la Formule 7.2 pour les réseaux 802.11b et 802.11g.

Standard	Classe de Trafic	Paramètres de la Classe de Trafic		Maximum Paquets/Sec (γ_{max}^e)	BPE (θ) (Kbits/Paquet)
802.11b	VoIP	-	-	900	12.22
	Vidéo	Direction :	UP	300	36.67
			DN	300	36.67
	CBR	Taille paquet :	1440 Bytes	388.88	28.28
			1024 Bytes	468.75	23.47
			500 Bytes	704	15.62
			100 Bytes	1120	9.82
802.11g	VoIP	-	-	6800	7.94
	Vidéo	Direction :	UP	1525	35.41
			DN	1975	27.34
	CBR	Taille paquet :	1440 Bytes	1611.11	33.52
			1024 Bytes	1937.5	27.87
			500 Bytes	2944	18.34
			100 Bytes	4800	11.25

TAB. 7.2 BPE expérimentale (Kbits/paquet) des différents classes de trafic

7.4.4 Approximations linéaires des régions d'admission

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la faisabilité d'établir un mécanisme de CAC basé sur la notion de BPE de chaque classe de trafic (VoIP, vidéo, et données). Nous avons d'abord démontré que les régions d'admission sont approximativement linéaires en présence de ces 3 classes de trafic. De plus, il a été observé que le nombre de paramètres influençant la région d'admission, surtout pour les sources CBR, est trop grand pour les mettre en oeuvre pratiquement. Dans le but de simplifier le mécanisme de CAC, les régions d'admission et la BPE ont donc été redéfinies en termes de paquets par seconde et bits par paquet, respectivement. Cette nouvelle définition permet d'établir un mécanisme de CAC simple qui utilise la BPE de chaque trafic selon les multiples paramètres de chaque flot présentée par le Tableau 7.2.

À partir de la définition de la région d'admission donnée dans la Section 6.1, on peut redéfinir la région d'admission comme suit. Un ensemble de sources de I classes de trafic est admissible si $\sum_{i=1}^I \theta_i \gamma_i \leq C$, où C est la capacité du canal en Kb/s, θ_i est la BPE de la classe de trafic i (définie par la Formule 7.2) et γ_i est le nombre total de paquets par seconde transmis pour toutes les sources de la classe i . Cependant, cette étude décrit le comportement d'un réseau WLAN 802.11 qui doit servir I classes de trafic où chaque classe de trafic a $J(i)$ paramètres influençant la région d'admission, tels que la taille des paquets ou la direction des flots. Alors la région admissible est l'ensemble des $\gamma_{i,j}$, où $\gamma_{i,j}$ représente le nombre total de paquets par seconde de la classe de trafic i de paramètre j transmis par toutes les sources, qui satisfont l'inégalité suivante :

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} \theta_{i,j} \gamma_{i,j} \leq C \quad \text{Kbits/sec} \quad (7.5)$$

où $\theta_{i,j}$ est la BPE de la classe de trafic i de paramètre j .

Le mécanisme de CAC proposé utilise donc la frontière approximative des régions d'admission calculée en utilisant l'inégalité 7.5 et les valeurs de BPE du Tableau 7.2. L'équation de cette frontière est donnée par :

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} \theta_{i,j} \gamma_{i,j} = C \quad (7.6)$$

Par exemple, considérons un réseau 802.11g servant deux classes de trafic tels que la VoIP (classe de trafic $i = 1$) et aucun paramètre ($J(1) = 1$) et les données CBR (classe de trafic $i = 2$) de paquets de taille de 1440 Bytes (paramètre de cette classe de trafic : $J(2) = 1$). Dans ce contexte, la Formule 7.6 devient alors :

$$\theta_{1,1} \gamma_{1,1} + \theta_{2,1} \gamma_{2,1} = C. \quad (7.7)$$

Avec cette équation linéaire et les valeurs de BPE de chaque type de trafic présentées dans le Tableau 7.2 ($\theta_{1,1} = 7.94$ et $\theta_{2,1} = 33.52$), il est possible de calculer le nombre de paquets par seconde de la VoIP ($\gamma_{1,1}$) en fonction du nombre de paquets par seconde des sources CBR ($\gamma_{2,1}$) en considérant que la capacité du lien est $C = 54000$ Kb/s. En effet, pour un échantillon des valeurs $\gamma_{2,1}$ données, il est facile de calculer les valeurs de $\gamma_{1,1}$ à partir de l'approximation linéaire :

$$\gamma_{1,1} = \frac{C - \theta_{2,1} \gamma_{2,1}}{\theta_{1,1}} \quad \text{paquets/sec} \quad (7.8)$$

La Figure 7.16 montre les régions d'admission réelle et approximative obtenues pour cet exemple. Une analyse similaire est utilisée pour évaluer les approximations linéaires des régions d'admission en présence des flots vidéo et CBR ainsi que celles en présence des flots vidéo et VoIP. Par exemple, la Figure 7.17 montre les régions d'admission (approximative et réelle) en présence des sources vidéo UP et des sources CBR UP de

1440 Bytes tandis que la Figure 7.18 montre celles en présence des sources vidéo (UP et DN) et des sources VoIP.

On constate en général que les régions d'admission réelles sont très proches des approximations linéaires proposées pour le CAC. Ce résultat est similaire à ceux obtenus dans les réseaux ATM. Ceci est encourageant et confirme notre hypothèse de départ que la BPE peut être utilisée pour implémenter la CAC dans les réseaux sans fil 802.11b/g. L'approximation linéaire qui est la moins bonne est un cas extrême dans lequel le réseau sert des sources vidéo en mode descendant et des sources CBR de taille de paquets de 1440 Bytes en mode ascendant. Ce cas est présenté par la Figure 7.19 où la région d'admission réelle et l'approximation linéaire sont tracées ensemble. Heureusement, l'approximation linéaire obtenue donne une limite inférieure où la QoS de toutes les sources sont toujours respectées car la région d'admission réelle est concave. Le réseau ne fera qu'opérer légèrement sous sa capacité maximale.

D'autre part, on pourrait penser que les régions d'admission approximatives qui se trouvent au-dessus des régions d'admission réelles, par exemple dans le cas de la Figure 7.16 ou de la Figure 7.18, ne satisferont pas les contraintes de QoS des différentes classes de trafic (VoIP et vidéo). Il devient alors intéressant d'évaluer l'impact de l'admission d'une connexion supplémentaire dans le système sur les contraintes de QoS. En d'autres mots, est-ce que les critères de QoS deviennent critiques lorsque le système travaille légèrement en dehors de la région d'admission réelle ?

Pour répondre à cette question, l'évaluation du taux de pertes des sources VoIP, le critère limitant le nombre de connexions admises dans le système, a été réalisé en considérant le même réseau 802.11g opérant avec des sources VoIP et des sources CBR UP avec un débit de 128 Kbps et taille de paquet de 1440 Bytes (Figure 7.16). Cette évaluation est réalisée avec un réseau qui doit servir une connexion de VoIP de plus que celles qui sont déjà admises (sources VoIP et CBR) dans la région d'admission réelle. La Figure 7.20

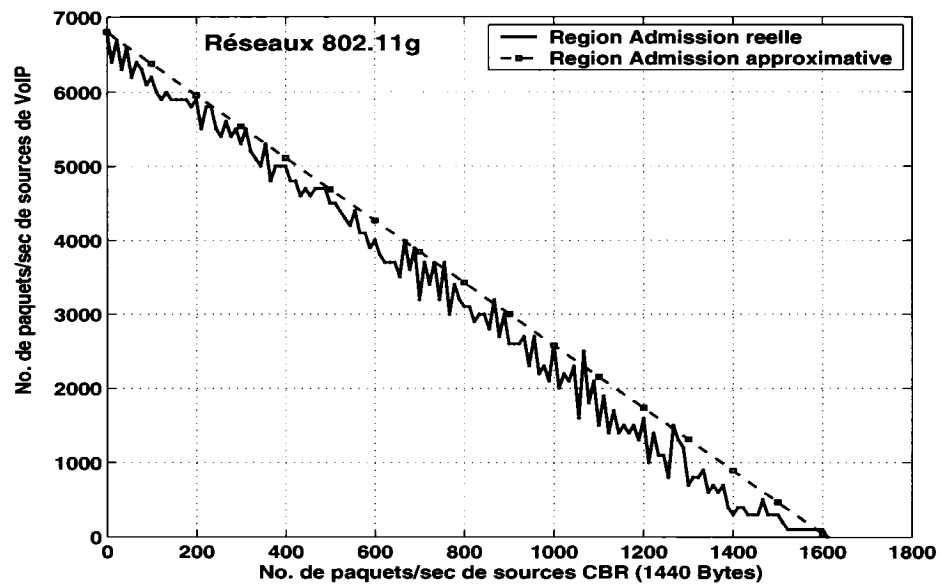


FIG. 7.16 Approximation linéaire d'un système VoIP + CBR (802.11g)

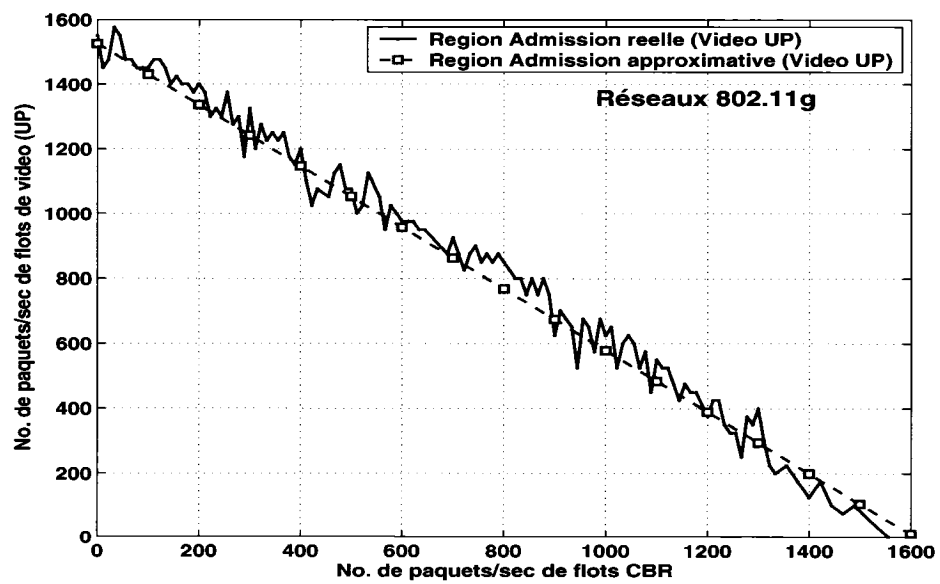


FIG. 7.17 Approximation linéaire d'un système Vidéo + CBR (802.11g)

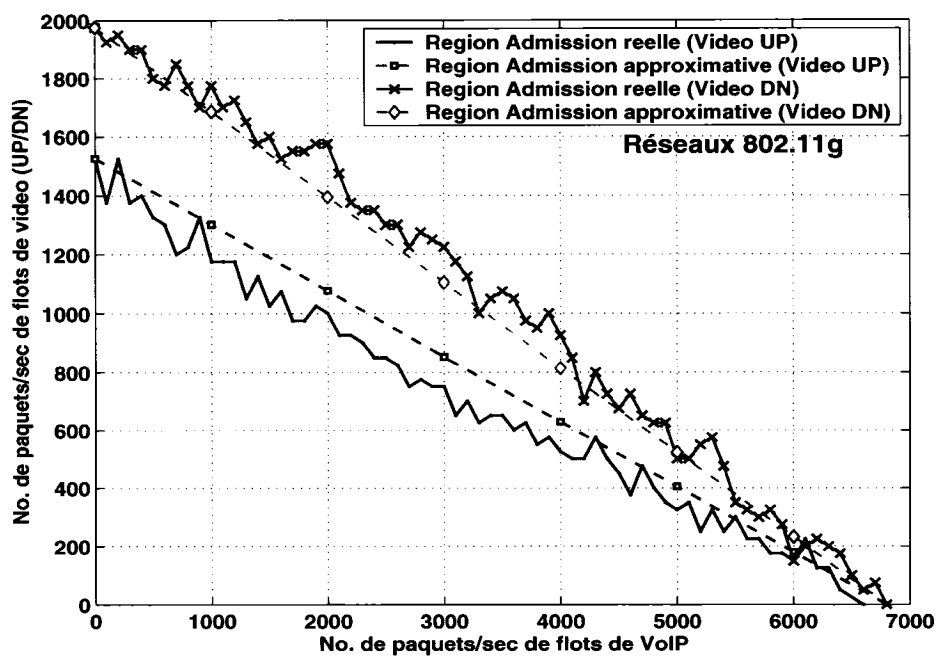


FIG. 7.18 Approximation linéaire d'un système Vidéo + VoIP (802.11g)

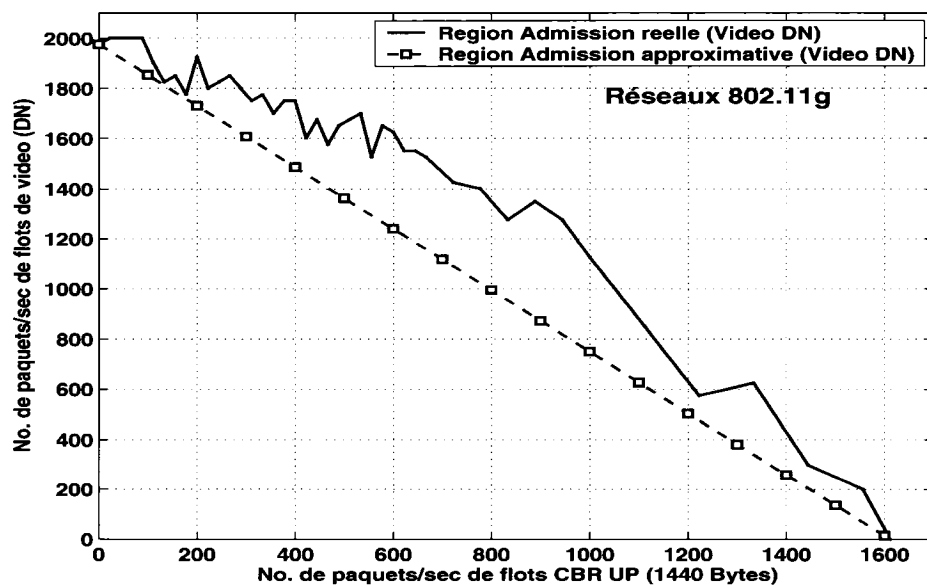


FIG. 7.19 Approximation linéaire Vidéo DN + CBR UP (802.11g)

présente la variation du taux de pertes des sources VoIP dans le contexte décrit auparavant. Cette figure montre qu'en rajoutant une connexion VoIP dans le réseau 802.11g, le taux de pertes subi une légère détérioration mais ne dépasse pas les 3%. Avec cette valeur du taux de pertes, la QoS de la communication de VoIP reste encore acceptable (tel que mentionné dans la Section 3.2.3.3) quand le système opère au-dessus de la région d'admission réelle.

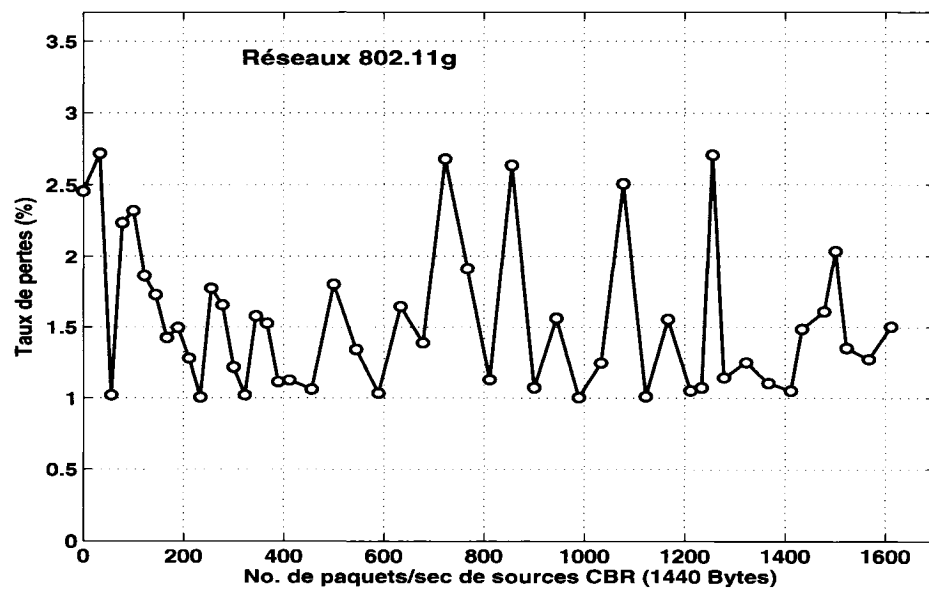


FIG. 7.20 Taux de pertes en dépassant la région d'admission approximative (802.11g)

7.5 Évaluation de l'impact du 802.11e

Finalement, cette étude décrit les impacts sur les régions d'admission réelles dans des réseaux qui utilisent les nouvelles propositions de différenciation des services du standard IEEE 802.11e. Étant donnée qu'il s'agit d'une proposition de différenciation de services en fonction de plusieurs priorités de trafic, il est donc intéressant d'étudier le comportement des régions d'admission en présence des trois classes de trafic : la VoIP, la Vidéo et les données CBR.

À noter que la version officielle du simulateur NS-2 ne possède pas le module qui réalise la simulation de la différenciation de services proposées par la norme 802.11e. Cependant, plusieurs modules additionnels ou « patches » implémentant la norme 802.11e sont disponibles sur Internet. Pour réaliser nos simulations, on a utilisé le module développé dans [80]. K. Chih-Heng explique la procédure d'installation et les validations du module. Il expose aussi des exemples sur l'utilisation de ce module dans la version 2.28 du simulateur NS-2.

Les configurations des réseaux 802.11b/e et 802.11g/e utilisées pour l'évaluation de l'impact des différenciations de services ont les mêmes caractéristiques que celles utilisées par les simulations des réseaux de base. La topologie et les paramètres physiques sont les mêmes que ceux des simulations présentées dans la Section 4.2. En utilisant les mêmes caractéristiques dans la simulation, on peut réaliser facilement une comparaison entre la performance d'un système qui utilise la différenciation des services et un autre qui n'en utilise pas.

Tel que mentionné dans le Chapitre 1, les normes 802.11b et 802.11g de base n'utilisent aucun mécanisme de différenciation de services et les trois classes de trafic, VoIP, vidéo et données CBR, accèdent au médium avec la même priorité. D'autre part, la norme 802.11e possède quatre possibilités de priorités d'accès (Section 2.4). On utilisera uniquement trois priorités qui sont assignées aux trois classes de trafic de la façon suivante :

- plus haute priorité pour les flots de VoIP (AC_VO)
- priorité intermédiaire pour les flots vidéo (AC_VI)
- priorité de "meilleur effort" pour le trafic de données CBR (AV_BE)

Les paramètres utilisés pour configurer la couche MAC de ces trois priorités d'accès sont présentés dans le Tableau 2.1.

On utilise la procédure expliquée dans la Section 7.2 pour déterminer les régions d'admission en présence des 3 classes de trafic différentes. Dans ce cas, les régions d'ad-

mission sont tracées dans un système à trois dimensions où chaque axe représente le nombre de connexions de chaque classe de trafic. Les Figures 7.21 et 7.22 présentent les régions d'admission pour les réseaux 802.11b/e et 802.11g/e respectivement. Malgré la complexité des graphiques, on peut constater que les régions d'admission perdent leur linéarité et prennent une forme concave.

Pour appuyer cette constatation, on trace dans un plan des coupes longitudinales de ces surfaces. En effet, on se fixe une charge fixe de sources vidéo et on évalue le nombre de connexions de VoIP en fonction du nombre de sources CBR. Plusieurs valeurs de charge sont considérés, et pour chaque cas, on trace la région d'admission des sources de VoIP et des sources CBR en fonction d'un nombre de sessions de vidéo fixe. Dans le cas des réseaux 802.11b/e, on a fixé le nombre des sources de vidéo à 0, 1, 5 et 9 connexions tandis que pour les réseaux 802.11g/e ce nombre a été fixé à 0, 1, 11, 22 et 27 connexions. Les Figures 7.23 (802.11g/e) et 7.24 (802.11g/e) montrent ces coupes longitudinales.

Dans ces deux dernières figures, on constate clairement que les régions d'admission perdent totalement leur linéarité. En effet, la différenciation des services proposée par la norme 802.11e, permet de maintenir une meilleure performance en présence d'un plus grand nombre de sessions en évitant la dégradation rapide des critères de performance des trafics de haute priorité. Cependant, ces résultats suggèrent aussi que le mécanisme de *Contrôle d'Admission des Connexions* basé sur les notions de BPE et des régions d'admission utilise une politique très conservatrice pour les réseaux 802.11e puisque les approximations linéaires s'éloignent des régions d'admission réelles. Le mécanisme de priorité est par définition non-linéaire puisqu'on essaie de maintenir au maximum la qualité d'une classe au détriment de l'autre, ce qui se reflète dans les régions d'admission. Cependant, le système travaillera tout le temps en-dessous de sa capacité maximale car les approximations linéaires sont des bornes inférieures des régions d'admission réelles. Toutes les caractéristiques de QoS vont toujours être respectées.

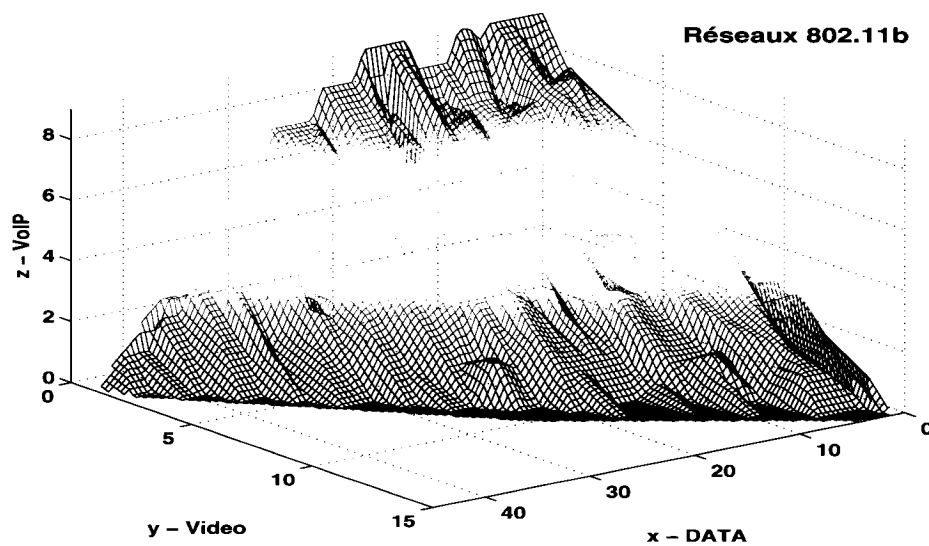


FIG. 7.21 Région d'admission en présence de 3 trafics dans un réseau 802.11b/e

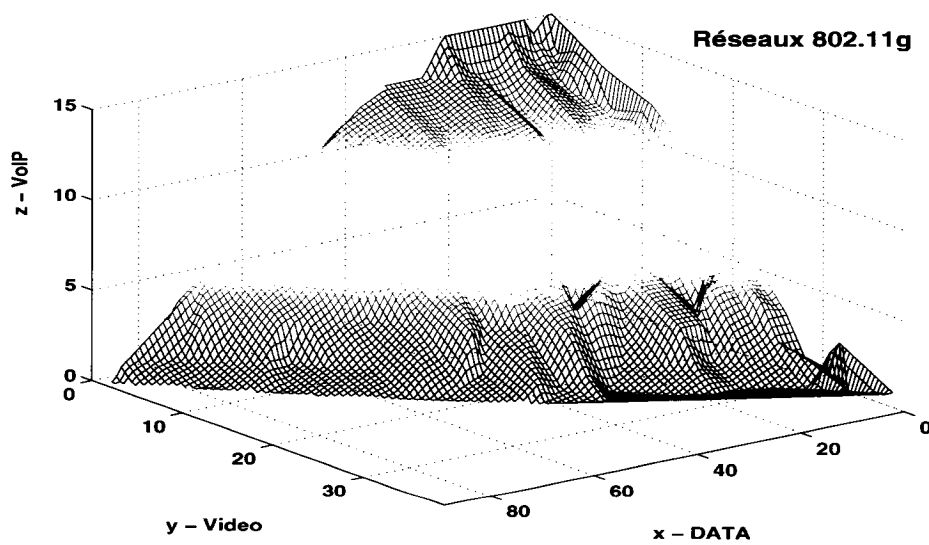


FIG. 7.22 Région d'admission en présence de 3 trafics dans un réseau 802.11g/e

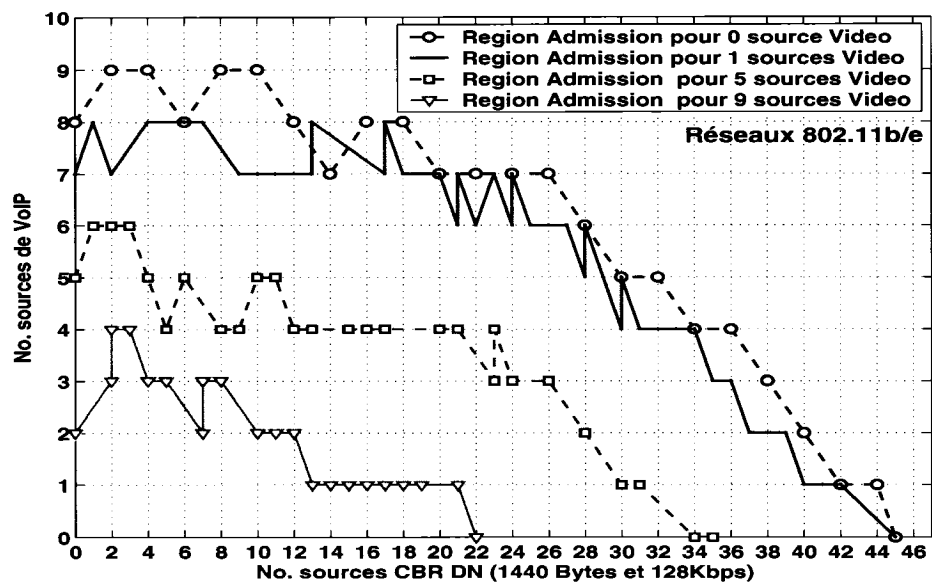


FIG. 7.23 Coupures longitudinales de la région d'admission (802.11b/e)

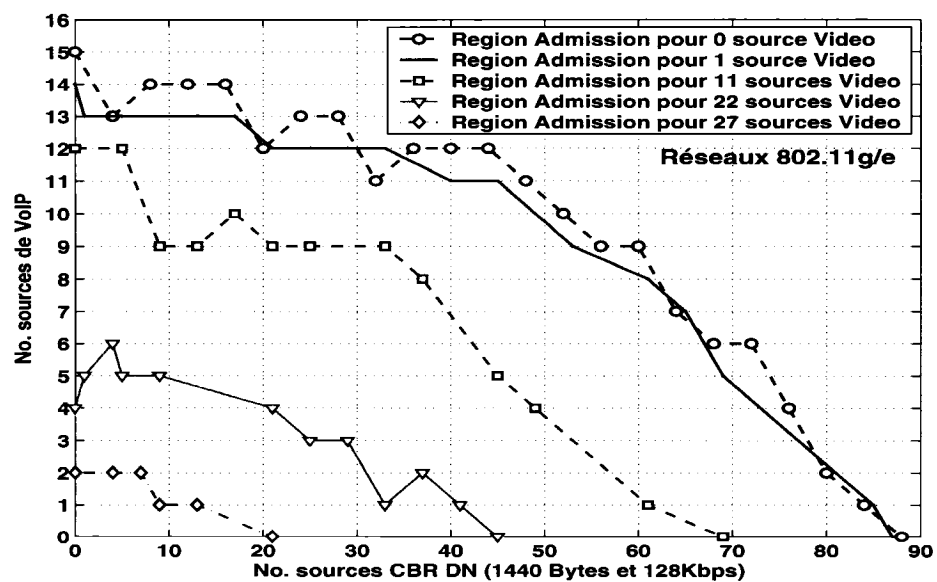


FIG. 7.24 Coupures longitudinales de la région d'admission (802.11g/e)

Pour appuyer cette conclusion, on peut illustrer le mécanisme de CAC basé sur la notion de BPE pour les réseaux 802.11e. On utilise la procédure décrite dans la Section 7.4.4 pour déterminer la région d'admission approximative dans les réseaux 802.11e. À titre d'exemple, on utilise les régions d'admission réelles obtenues précédemment (Figures 7.23 et 7.24) en présence des sources VoIP, des sources CBR DN (1440 Bytes et 128 Kbps) et 1 source vidéo. Les Figures 7.25 et 7.26 montrent les régions d'admission approximatives pour les réseaux 802.11b/e et 802.11g/e dans cet exemple. Ces dernières figures montrent clairement que les régions d'admission approximatives s'éloignent des régions d'admission réelles.

Pour réaliser une comparaison entre la performance d'un réseau 802.11 de base et la performance d'un réseau avec différenciation des services (802.11e), on utilise à nouveau les résultats obtenus par les deux figures précédentes (Figures 7.23 et 7.24). Pour cela, on réalise des simulations en présence des trois classes de trafic dans un réseau 802.11 de base et un 802.11e. Par exemple, le système doit servir des sources VoIP, des sources CBR DN (1440 Bytes et 128 Kbps) en présence d'une charge fixe des connexions vidéo. Les sources vidéo sont fixées à 1 ou 5 pour les réseaux 802.11b et à 1 ou 22 pour les réseaux 802.11g. Les Figures 7.27 et 7.28 montrent les comparaisons réalisées pour ces exemples.

Dans ces dernières figures, nous pouvons noter que le nombre de sources d'une classe de trafic pouvant être admis lorsque le trafic est homogène est inférieur avec le 802.11e pour les classes de haute priorité. Ceci est peut-être dû à la diminution de la fenêtre de contention qui augmente la probabilité de collision et par conséquent le temps de transmission pour avoir un paquet correctement reçu.

La dernière constatation sur les résultats obtenus par simulation est qu'une importante détérioration du nombre de connexions de toutes les classes de trafic (VoIP, vidéo et CBR) dans les réseaux qui fonctionnent avec la norme 802.11g. Cette importante dété-

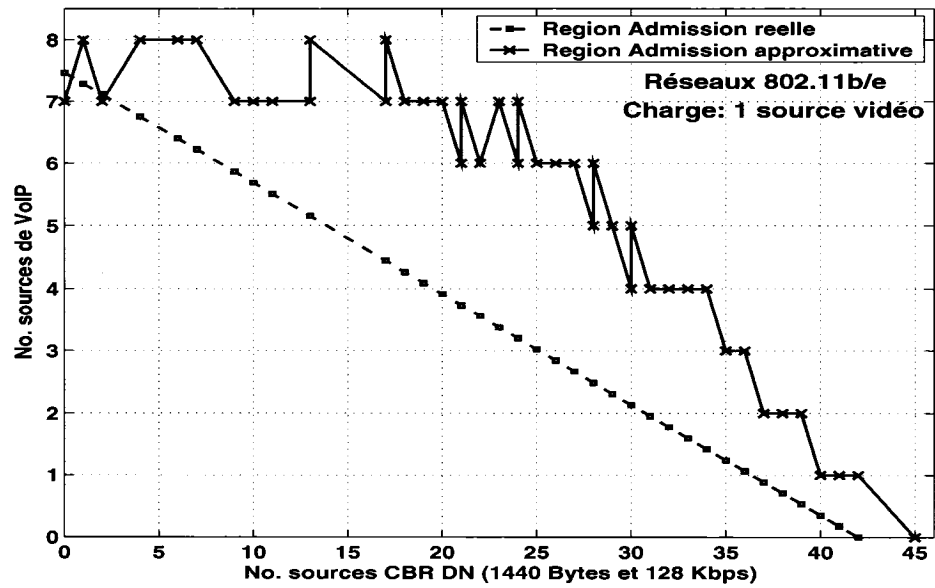


FIG. 7.25 Exemple approximation linéaire de la région d'admission (802.11b/e)

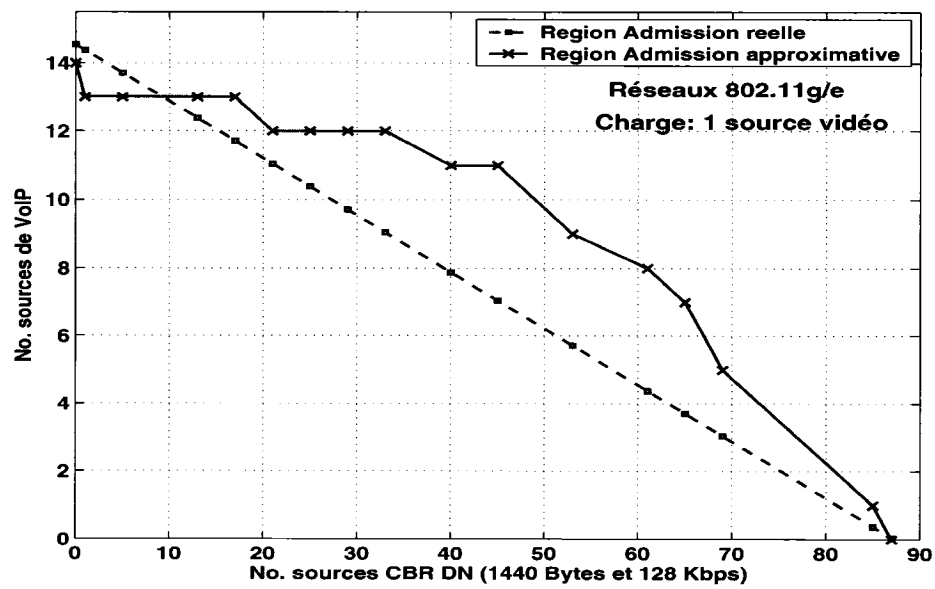


FIG. 7.26 Exemple approximation linéaire de la région d'admission (802.11b/e)

rioration n'est pas présente dans les réseaux 802.11b où le mécanisme de différenciation des services permet une amélioration de la performance et de la capacité des réseaux sans fil. On pense donc que les résultats obtenus pour les simulations des réseaux 802.11g/e ne sont pas valables et que peut être cette dégradation de la performance ne se produit pas dans les systèmes réels. On considère que le simulateur NS-2 biaise les résultats obtenus parce que les modules du 802.11e pour NS-2 ne sont pas encore totalement développés et testés pour les réseaux 802.11g. Une étude de ce phénomène et une validation du module 802.11e du simulateur NS-2 nécessiterait une analyse plus approfondie.

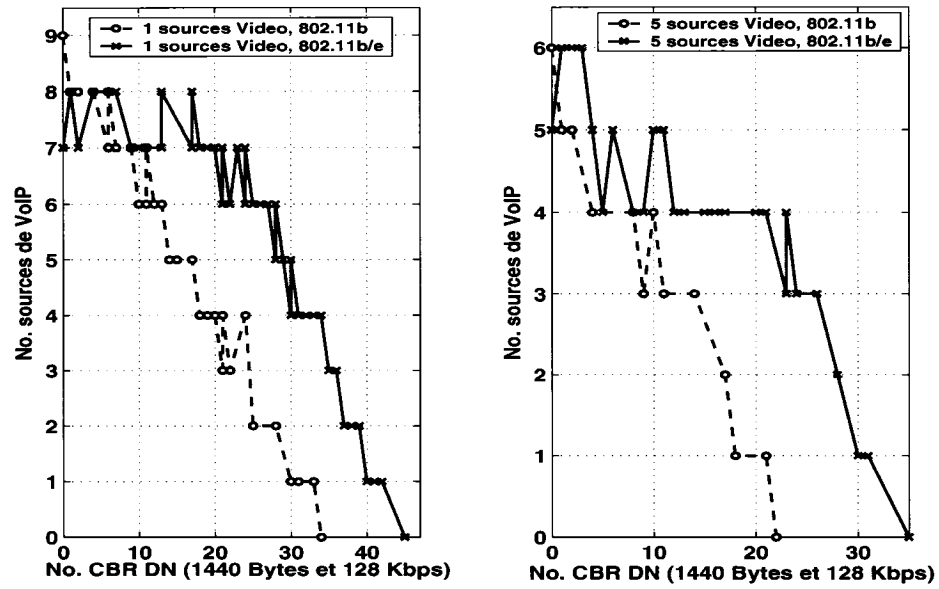


FIG. 7.27 Comparaison performance entre les réseaux 802.11b et 802.11b/e

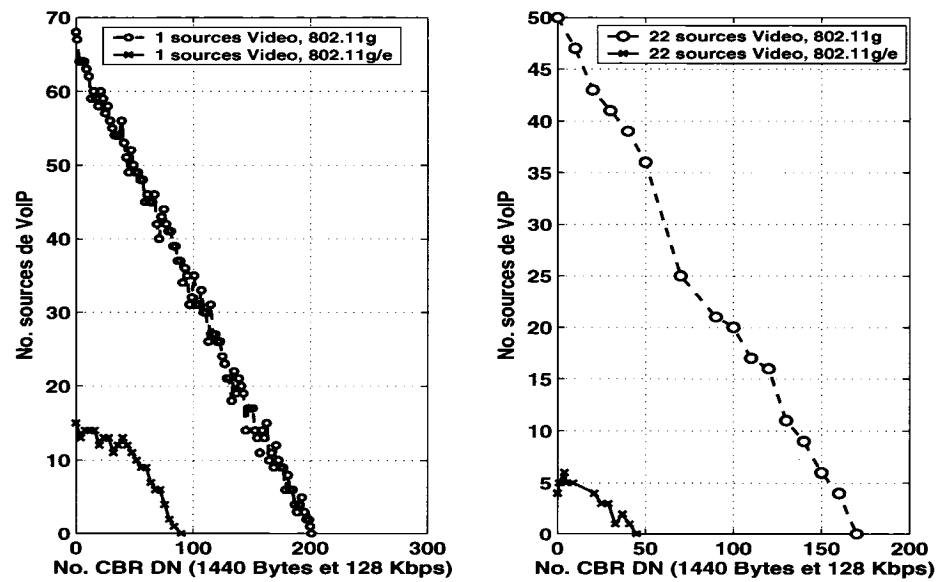


FIG. 7.28 Comparaison performance entre les réseaux 802.11g et 802.11g/e

CONCLUSION

La norme IEEE 802.11 établit les spécifications des réseaux locaux sans fil à haut débit. Dans ces réseaux, plusieurs dispositifs sont reliés sur un rayon de quelques dizaines de mètres dans un environnement fermé, ou sur un rayon de centaines de mètres dans un environnement ouvert. Ces réseaux ont une topologie flexible et des coûts raisonnables pour leur mise en place. De plus, cette nouvelle technologie s'oriente vers l'intégration des services multimédia, voix et vidéo, avec les trafics de données, ce qui donnera plusieurs avantages aux usagers.

Dans ce mémoire, une étude détaillée du fonctionnement de la couche MAC des réseaux IEEE 802.11b et 802.11g suggère que le mécanisme de contention pour accéder au médium (i.e, DCF) est très défavorable à la transmission des applications en temps réel tels que la VoIP et la vidéo. En effet, ce mécanisme d'accès introduit un temps supplémentaire, l'overhead, pour chaque paquet transmis qui est responsable de la dégradation de plusieurs critères de QoS ayant ainsi un impact sur la satisfaction des usagers. Quand les réseaux sont fortement chargés ou en saturation, la transmission à partir du point d'accès (AP) devient le goulot d'étranglement du système. Plus précisément, l'AP, qui a toujours plus de paquets à transmettre que les STAs, est en contention sans aucune priorité d'accès. Ceci montre l'inéquité du mécanisme d'accès DCF envers l'AP ou n'importe quel STA qui a plus de charge. Il est aussi important de souligner que l'efficacité du DCF se réduit considérablement en présence d'un très grand nombre de STAs en contention.

Par la suite, dans ce projet un simulateur d'un réseau sans fil avec infrastructure et multiservice, c'est-à-dire un réseau où convergent des flots de voix, vidéo et données CBR a été utilisé. Ces simulations établissent le nombre de connexions maximales selon chaque classe de trafic sujet aux caractéristiques de chaque flot. Ces valeurs maximales ont été calculées en fonction des limites de critères de QoS qui ont été fixées dans ce projet pour

garantir la satisfaction des usagers. Les résultats ont fait ressortir le faible nombre de connexions de VoIP/vidéo supporté dans un canal qui transmet à débit élevé, 11 Mbps et 54 Mbps. Dans ce contexte, le mécanisme DCF a moins d'effet sur la transmission des grands paquets que sur celle des petits paquets en améliorant la performance des réseaux WLANs. D'autre part, utiliser un CODEC de VoIP, avec un taux de compression plus élevé n'améliore pas significativement le nombre maximal de connexions qui ne dépassent pas les limites de QoS. Ces dernières constatations révèlent que l'opération des réseaux WLANs a un comportement extrêmement différent à celui des réseaux câblés.

Subséquentement, le prototype a permis d'analyser le comportement de la **bande passante effective (BPE)** de chacune des classes de trafic. Cette dernière valeur représente la quantité minimale de bande passante nécessaire par chaque flot pendant sa connexion en considérant les caractéristiques suivantes : l'opération de la couche MAC, ses besoins quant aux critères de QoS et le nombre de connexions déjà actives dans le système. Le fonctionnement du MAC introduit un overhead, ce qui explique pourquoi la BPE d'une source est de beaucoup supérieure à son débit. La meilleure performance des réseaux, c'est-à-dire lorsque les valeurs de BPE sont plus faibles, se produit en présence de flots avec de grands paquets et un réseau avec moins de stations en contention.

De plus, le comportement et l'évolution des régions d'admissions en présence de différentes combinaisons de ces trafics sont évalués en démontrant la linéarité de la plupart de ces courbes. L'étude présente aussi le cas extrême où les approximations linéaires s'éloignent des courbes réelles, c'est-à-dire en présence des flots de vidéo et de CBR ayant chacun des directions de transmission opposées. Ces résultats permettent de conclure qu'en général il est possible d'implémenter des algorithmes de Contrôle d'Admission de Connexion dans les réseaux IEEE 802.11b et 802.11g en utilisant les nombre maximum de connexions admises et leur BPE calculés par simulation. Ce mécanisme de CAC permet d'accepter ou de rejeter une nouvelle connexion si la somme de BPE de toutes les connexions actives atteint ou non la capacité du lien. Néanmoins, la mise

en place des schémas de CAC est difficile en considérant le traitement de tous les paramètres de chaque classe de trafic. Par conséquent, une importante contribution de cette recherche est la proposition d'une redéfinition de la BPE et des régions d'admission dans le but de simplifier le mécanisme de CAC. Cette nouvelle définition permet l'élimination de traitement de certains des paramètres des trafics de VoIP et des flots CBR sans affecter la linéarité des régions d'admission réelles. Le principe utilisé pour les réseaux ATM d'établir le CAC en fonction d'une frontière linéaire des régions d'admission peut donc être utilisée dans les réseaux WLANs 802.11.

D'autre part, une comparaison entre la performance d'un système avec les nouvelles propositions de la norme IEEE 802.11e et celle d'un simple réseau 802.11 est aussi présentée. Dans ce contexte, les simulations ont démontré que la proposition de différenciation des services élimine la linéarité des régions d'admission. L'approximation linéaire des régions d'admission proposée par cette étude devient une limite inférieure des régions d'admission réelles car ces dernières ont une forme concave. La mise en place d'un mécanisme de CAC linéaire est donc une solution conservative qui permet au système de travailler en-dessous de sa capacité réelle. Cependant, on peut penser que d'autres approximations « non-linéaires » peuvent mieux s'adapter au système pour réaliser le CAC. Il faudrait éventuellement effectuer une analyse plus détaillée de ces solutions.

Finalement, l'étude montre deux comportements différents des réseaux 802.11e en fonction de la norme physique utilisée : le 802.11b ou le 802.11g. La différenciation des services pour le réseau 802.11b/e permet des meilleures performances de la capacité du réseau que celui qui utilise la norme de base 802.11b. Ce résultat permet de conclure que le système est effectivement mieux adapté aux trafics avec plus élevée priorité. Cependant, cette amélioration n'est pas visible dans un système qui utilise les caractéristiques de la norme 802.11g. Contrairement aux réseaux 802.11b, une forte détérioration de la performance de ces réseaux est observée. Ceci nous fait penser que le module du

802.11g/e utilisé pour réaliser les simulations sur NS-2 donne des résultats biaisés. Il est donc conseillé de réaliser une vérification plus approfondie de ce phénomène.

L'utilisation des réseaux où le canal physique n'est plus idéal (comme c'était le cas dans ce projet) pour évaluer l'évolution du comportement des régions d'admission est une perspective de recherche intéressante pour le futur. Les interférences et obstacles externes ainsi que le mouvement sont des caractéristiques à considérer pour l'étude de la bande passante effective de chaque classe de trafic et des régions d'admissions du système. De la même façon, il est aussi important de mettre en place des modèles théoriques plus complets du système qui valideront et permettront de mieux comprendre les résultats expérimentaux présentés dans ce projet.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] IEEE. *Std. for Information Technology — Telecommunications and Information Exchange between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements — Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Computer Society/Local and Metropolitan Area Networks, 2 édition, 1999.
- [2] H. Azmi. Bande Passante Effective pour les Applications à Qualité de Service Garantie. Mémoire de Maîtrise, Université de Québec, INRS-Énergie, Matériaux et Télécommunications, janvier 2005.
- [3] C. S. Chang et J. A. Thomas. Effective Bandwidths in High-Speed Digital Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13(6) :1091 – 1100, août 1995.
- [4] F. Tobagi et L. Kleinrock. Packet Switching in Radio Channels : Part II — The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution. In *Proc. IEEE Transactions on Communications*, volume 23, issue : 12, pages 1417 – 1433, décembre 1975.
- [5] L. B. Jiang et S. C. Liew. Removing Hidden Nodes in IEEE 802.11 Wireless Networks. In *Proc. IEEE 62nd Vehicular Technology Conference*, volume 2, pages 1127 – 1131, septembre 2005.
- [6] B.P. Crow, I. Widjaja, L.G. Kim, et P. Sakai. Investigation of the IEEE 802.11 Medium Access Control (MAC) Sublayer Functions. In *Proc. 16th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 1, pages 126 – 133, avril 1997.
- [7] M. S. Gast. *802.11 Wireless Networks : The Definitive Guide*. O'Reilly and Associates, Inc, 2002.

- [8] G. Bianchi. Performance Evaluation of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 18(3) :535 – 547, mars 2000.
- [9] C. H. Foh et M. Zukerman. Performance Analysis of the IEEE 802.11 MAC Protocol. In *Proc. Eur. Wireless*, pages 184 – 190, 2002.
- [10] S. Garg et M. Kappes. An Experimental Study of Throughput for UDP and VoIP Traffic in IEEE 802.11b Networks. In *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, volume 3, pages 1748 – 1753, mars 2003.
- [11] Y. Xiao et J. Rosdahl. Throughput and Delay Limits of IEEE 802.11. *IEEE Communications Letters*, 6(8) :355 – 357, août 2002.
- [12] H. Zhai, X. Chen, et Y. Fang. How well can the IEEE 802.11 Wireless LAN Support Quality of Service ? *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(6) :3084 – 3094, novembre 2005.
- [13] M. Veeraraghavan, N. Cocker, et T. Moors. Support of voice services in IEEE 802.11 wireless LANs. In *Proc. 20th IEEE Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 1, pages 488 – 497, avril 2001.
- [14] A. Köpsel et A. Wolisz. Voice Transmission in an IEEE 802.11 WLAN Based Access Network. In *Proc. 4th ACM Int. Works. Wireless Mobile Multimedia*, pages 23 – 32, 2001.
- [15] J.-Yuan Yeh et C. Chen. Support of Multimedia Services with the IEEE 802.11 MAC Protocol. In *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, volume 1, pages 600 – 604, avril 2002.
- [16] C. Li, J. Li, et X. Cai. Performance Analysis of IEEE 802.11 WLAN to Support Voice Services. In *Proc. 18th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, volume 2, pages 343 – 346, 2004.

- [17] T. Suzuki et S. Tasaka. Performance Evaluation of Integrated Video and Data Transmission with the IEEE 802.11 Standard MAC Protocol. In *Proc. Global Telecommunications Conference*, volume 1B, pages 580 – 586, 1999.
- [18] A.Köpsel, J.P. Ebert, et A. Wolisz. A Performance Comparison of Point and Distributed Coordination Function of an IEEE 802.11 WLAN in the Presence of Real-Time Requirements. In *Proc. 7th Intl. Workshop on Mobile Multimedia Communications*, octobre 2000.
- [19] S. Garg et M. Kappes. Can I add a VoIP Call ? In *Proc. IEEE International Conference on Communications*, volume 2, pages 779 – 783, mai 2003.
- [20] M. Elaoud et P. Agrawal. Voice Capacity in IEEE 802.11 Networks. In *Proc. 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, volume 1, pages 78 – 82, septembre 2004.
- [21] M. Eiger, M. Elaoud, et D. Famolari. The Effect of Packetization on Voice Capacity in IEEE 802.11b Networks. In *Proc. Second IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pages 267 – 271, janvier 2005.
- [22] D. P. Hole et F. A. Tobagi. Capacity of an IEEE 802.11b Wireless LAN Supporting VoIP. In *Proc. IEEE International Conference on Communication*, volume 1, pages 196 – 201, juin 2004.
- [23] K. Medepalli, P. Gopalakrishnan, D. Famolari, et T. Kodama. Voice Capacity of IEEE 802.11b, 802.11a and 802.11g Wireless LANs. In *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference*, volume 3, pages 1549 – 1553, novembre 2004.
- [24] M. Elaoud, D. Famolari, et A. Ghosh. Experimental VoIP Capacity Measurements for 802.11b WLANs. In *Proc. Second IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pages 272 – 277, janvier 2005.
- [25] F. Anjum, M. Elaoud, D. Famolari, A. Ghosh, et R. Vaidyanathan. Voice Performance in WLAN Networks — An Experimental Study. In *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference*, volume 6, pages 3504 – 3508, décembre 2003.

- [26] A. Zahedi et K. Pahlavan. Capacity of a Wireless LAN with Voice and Data Services. *IEEE Transactions on Communications*, 48 :1160 – 1170, 2000.
- [27] M. Shimakawa, D. P. Hole, et F. A Tobagi. Video-conferencing and Data Traffic over an IEEE 802.11g WLAN using DCF and EDCA. In *Proc. 2005 IEEE International Conference on Communications*, volume 2, pages 1324 – 1330, mai 2005.
- [28] S. Gopal, K. Ramaswamy, et C. Wang. On Video Multicast over Wireless LANs. In *Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, volume 2, pages 1063 – 1066, juin 2004.
- [29] I. Izzat, M. Mayer, R. Rhodes, et T. Stahl. Real Time Transmission of MPEG2 Video over 802.11a Wireless LANs. In *Proc. International Conference on Consumer Electronics*, pages 309 – 310, janvier 2005.
- [30] P. Ikkurthy et M. A. Labrador. Characterization of MPEG-4 Traffic over IEEE 802.11b Wireless LANs. In *Proc. 27th Annual IEEE Conference on LOCAL Computer Networks*, pages 421 – 427, novembre 2002.
- [31] J.-O. Kim, H. Tode, et K. Murakami. Channel Access Protocol for Video Packets in IEEE 802.11 Networks. In *Proc. 2005 International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, pages 498 – 503, 2005.
- [32] S. Zou, H. Wu, et S. Cheng. A New Mechanism of Transmitting MPEG-4 Video in IEEE 802.11 Wireless LAN with DCF. In *Proc. International Conference on Communication Technology Proceedings*, pages 1226 – 1229, avril 2003.
- [33] J.-J. Beaudoin, G. Tran, P.-M. Tardif, et P. Fortier. Underground Experiments of Video Transmission over an IEEE 802.11 Infrastructure. In *Proc. IEEE 60th Vehicular Technology Conference*, volume 5, pages 3610 – 3614, septembre 2004.
- [34] J. Villalon, P. Cuenca, et L. Orozco-Barbosa. Limitation and Capabilities of QoS Support in IEEE 802.11 WLANS. In *Proc. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing*, pages 633 – 636, août 2005.

- [35] Q. Ni, L. Romdhani, et T. Turetletti. A survey of QoS Enhancements for IEEE 802.11 Wireless LAN. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 4(5) :547–566, 2004.
- [36] F. Micó, P. Cuenca, et L. Orozco-Barbaosa. QoS in IEEE 802.11 Wireless LAN : Current Research Activities. In *Proc. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, volume 1, pages 447 – 452, mai 2004.
- [37] A. Almquist et A. Lindgren. Quality of Service Schemes for IEEE 802.11. Mémoire de Maîtrise, Lulea University of Technology, mai 2001.
- [38] IEEE 802.11e task group. *IEEE P802.11e/D11.0 Draft Amendment to IEEE Std 802.11, " Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications : Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS), IEEE 802.11 e*. IEEE Computer Society/Local and Metropolitan Area Networks, 11 édition, octobre 2004.
- [39] G. Bianchi, I. Tinnirello, et L. Scalia. Understanding 802.11e Contention-Based Prioritization Mechanisms and Their Coexistence with Legacy 802.11 Stations. *IEEE Network*, 19(4) :28 – 34, juillet - août 2005.
- [40] C. Casetti, C.F. Chiasserini, L. Merello, et G. Olmo. Supporting Multimedia Traffic in 802.11e WLANs. In *IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, volume 4, pages 2340 – 2344, mai – juin 2005.
- [41] J. W. Tantra, C. H. Foh, et A. B Manouer. Throughput and Delay Analysis of the IEEE 802.11e EDCA Saturation. In *Proc. IEEE International Conference on Communications*, volume 5, pages 3450 – 3454, mai 2005.
- [42] G. He et C. Q. Shen. Simulation Study of IEEE 802.11e EDCF. In *Proc. 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, VTC*, volume 1, pages 685 – 689, avril 2003.

- [43] A. Grilo et M. Nunes. Performance Evaluation of IEEE 802.11e. In *Proc. 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, volume 1, pages 511 – 517, septembre 2002.
- [44] A. Trad, F. Munir, et H. Afifi. Capacity Evaluation of VoIP in IEEE 802.11e WLAN Environment. Rapport technique, INRIA, Disponible à : <http://www.inria.fr/rrrt/rr-5654.html>, août 2005.
- [45] R. G. Garroppo, S. Giordano, et S. Lucetti. Admission Region for Multimedia Services in IEEE 802.11e Systems. In *Proc. 11th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium*, pages 411 – 416, juin 2004.
- [46] D. Chen, D. Gu, et J. Zhang. Supporting Real-time Traffic with QoS in IEEE 802.11e Based Home Networks. In *Proc. First IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pages 205 – 209, janvier 2004.
- [47] A. Guchhait, R. Muralidhar, et A. Bayre. Performance of Real-Time Traffic in EDCA-based IEEE 802.11b/g WLANs. In *Proc. First International Conference on Communication System Software and Middleware, Comsware 2006*, janvier 2006.
- [48] S. Garg et M. Kappes. Admission Control for VoIP Traffic in IEEE 802.11 Networks. In *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference*, volume 6, pages 3514 – 3518, décembre 2003.
- [49] H. Zhai, X. Chen, et Y. Fang. A Call Admission and Rate Control Scheme for Multimedia Support over IEEE 802.11 Wireless LANs. *Wireless Networks*, 12(4) :451 – 463, juillet 2006.
- [50] A. Barbaresi, S. Barberis, et P. Gorla. Admission Control Policy for WLAN Systems Based on the “Capacity Region”. In *Proc. IST Mobile Summit, Dresden, Germany*, juin 2005.
- [51] L. Lin, H. Fu, et W. Jia. An Efficient Admission Control for IEEE 802.11 Networks based on Throughput Analysis of (Un)saturated Channel. In *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference*, volume 5, pages 3017 – 3021, novembre 2005.

- [52] M. Hegde, S.V.R. Anand, A. Kumar, et J. Kuri. WLAN Manager (WM) : a Device for Performance Management of a WLAN. *International Journal of Network Management*, 17(2) :155 – 170, décembre 2006.
- [53] D. Gao, J. Cai, et K. N. Ngan. Admission Control in IEEE 802.11e Wireless LANs. *IEEE Network*, 19(4) :6 – 13, juillet – août 2005.
- [54] A. Berger et W. Whitt. Extending the Effective Bandwidth Concept to Networks with Priority Classes. *IEEE Communications Magazine*, pages 78 – 83, août 1998.
- [55] K. M. Elsayed et Harry G. Perros. On the Effective Bandwidth of Arbitrary ON/OFF Sources. In *Proc. Data Communications and their Performance*, pages 257 – 271, 1995.
- [56] A. Elwalid et D. Mitra. Effective Bandwidth of General Markovian Traffic Sources and Admission Control for High-Speed Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 51(9) :1524 – 1535, septembre 1993.
- [57] R. Guerin, H. Ahmadi, et M. Naghshined. Equivalent Capacity and its Application to Bandwidth Allocation in High-Speed Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 9(7) :968 – 981, septembre 1991.
- [58] M. Angulo, D. Torres-Roman, M. Turrubiartes, et D. Muñoz-Rodríguez. Admission Control of a Stateless Network : Effective Bandwidth Approach. In *Proc. 15th International Conference on Electronics, Communications and Computers*, pages 183 – 187, février 2005.
- [59] J. S. Evans et D. Everitt. Effective Bandwidth-Based Admission Control for Multi-service CDMA Cellular Networks. In *Proc. IEEE Transactions on Vehicular Technology*, volume 48, pages 36 – 46, janvier 1999.
- [60] D. Bensoussan. *De la Téléphonie numérique à la téléphonie Internet*, volume 1. École de Technologie Supérieure, Montréal - Québec, 1 édition, 2001.
- [61] O. Hersent, J.-P. Petit, et D. Gurle. *Beyond VoIP Protocols*. John Wiley and Sons, 2005.

- [62] F. H. P. Fitzek et M. Reisslein. MPEG-4 and H.263 Video Traces for Network Performance Evaluation. Disponible : <http://www.tkn.tu-berlin.de/research/trace/trace.html>.
- [63] F. H. P. Fitzek et M. Reisslein. MPEG-4 and H.263 Video Traces for Network Performance Evaluation. *IEEE Networks*, 15(6) :40 – 54, novembre – décembre 2001.
- [64] G. Anastasi et L. Lenzini. QoS provided by the IEEE 802.11 Wireless LAN to Advanced Data Applications : a Simulation Study. *Wireless Networks*, 6(2) :99 – 108, mai 2000.
- [65] J. Dégila, B. Sansò, et A. Girad. A Tutorial of Quality of Service Concepts for Voice over IP. Rapport technique, École Polytechnique de Montréal, novembre 2005. Référence : Mme. Brunilde Sansò.
- [66] International Telecommunication Union (ITU). *Transmission Systems and Media, General Recommendation on the Transmission Quality for an Entire International Telephone Connection ; One Way Transmission Time. Recommendation G.114*. Telecommunication Standardization Sector of ITU, Genève, Suisse, mars 1993.
- [67] AVAYA. Avaya IP Voice Quality Network Requirements. White Papers 3.0, Avaya, www.avayadocs.com, avril 2004.
- [68] P. Calyam, M. Sridharan, W. Mandrawa, et P. Schopis. Performance Measurement and Analysis of H.323 Traffic. Rapport technique, The Ohio State University, 2004. Disponible : <http://www.pam2004.org/papers/222.pdf>.
- [69] S. Jang, E.B. Kelly, et A. W. Davis. A Technical FAQ : Frequently Asked Questions About Voice and Video over IP Networks. Rapport technique, Wainhouse Research, janvier 2003. Disponible : www.wainhouse.com.
- [70] S. Murphy, M. Searless, C. Rambeau, et L. Murphy. Evaluating the Impact of Network Performance on Video Streaming Quality for Categorized Video Content.

- Rapport technique, UCD School of Computer Science and Informatics, 2004. Disponible : www.cs.ucd.ie/staff/lmurphy/home/mypubs/michael-sean-pv2004-cr.pdf.
- [71] QoSmetric Inc. Video Quality of Service over IP White Paper. www.qosmetrics.net, octobre 2004.
- [72] IETF. *RFC 2679 — A One-way Delay Metric for IP Performance Metrics (IPPM)*. Internet Engineering Task Force, septembre 1999.
- [73] IETF. *RFC 2680 — A One way Loss Metric for for IP Performance Metrics (IPPM)*. Internet Engineering Task Force, septembre 1999.
- [74] W. Jiang et H. Schulzrinne. QoS Measurement of Internet Real-Time Multimedia Services. Rapport technique, Department of Computer Science - Columbia University, décembre 1999.
- [75] J. Linden. Achieving the Highest Voice Quality for VoIP Solutions. Rapport technique, Global IP Solutions, Disponible : <http://www.gipscorp.com/default/case-studies.html>, octobre 2004. Article présenté dans 2004 GSPx "The International Embedded Solutions Event".
- [76] NS2. NS-2 Network Simulator (v2.1b9). Disponible à : <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [77] H. Perros. *Computer Simultion Techniques : The definitive Introduction !* NC State University, <http://www.csc.ncsu.edu/faculty/perros/hp.html>, 2003.
- [78] F. Kelly. Effective Bandwidths at Multi-Class Queues. *Queueing Systems Theory and Applications*, 9(1-2) :5–15, octobre 1991.
- [79] F. Kelly. *Notes on Effective Bandwidth*, volume 4 of *Royal Statistical Society Lecture Notes Series*, chapter 8, pages 141–168. Oxford University Press, Cambridge University, 1995.
- [80] K. Chih-Heng. Examples for CBR Traffic Transmission over DCF-Based and EDCF-Based Wireless Networks. Disponible à : <http://hpds.ee.ncku.edu.tw/smallko/ns2/ns2.htm>.

- [81] NS-2. NS-2 : Mailing List. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-lists.html>.
- [82] K. Fall et K. Varadhan. The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation. Rapport technique, UC Berkeley, USC/ISI, août 2006.
- [83] J. Chung et M. Claypool. Ns by Example. Disponible : <http://nile.wpi.edu/NS/>.
- [84] E. Altman et T. Jiménez. Ns Simulator for Beginners — Lecture Notes. Disponible : <http://www-sop.inria.fr/mistral/personnel/Eitan.Altman/COURS-NS/n3.pdf>, décembre 2003 – 2004.
- [85] P. Anelli et E. Horlait. NS-2 : Principes de Conception et d’Utilisation. Disponible : www-sop.inria.fr/rodeo/personnel/Pierre.Ansel/Manuel_NS1.3.pdf, septembre 1999.
- [86] J. Robinson. Making NS-2 simulate an 802.11b link (Electrical and Computer Engineering — Rice University). Disponible : www.ece.rice.edu/jpr/ns/docs/ns-802_11b.htm.
- [87] W. Xiuchao. Simulate 802.11b Channel within NS2. Disponible : www.comp.nus.edu.sg/wuxiu-cha/research/reactive/report/80211ChannelinNS2_new.pdf.

ANNEXE I

FORMAT DES TRAMES

Format général de la trame MAC.- Le format de la trame MAC est le même peu importe la méthode d'accès au médium utilisée. Chacune est composée de plusieurs champs qui forment trois parties principales (Figure I.1) :

1. *L'entête MAC* où se trouvent les champs de contrôle, de durée et les adresses d'origine et destination, entre autres.
2. *Le corps de la trame*, de longueur variable, contient l'information à transmettre des couches supérieures.
3. Le *FCS (Frame Check Sequence)* contient un code de redondance cyclique de 32 bits (CRC) pour la détection des erreurs de transmission.

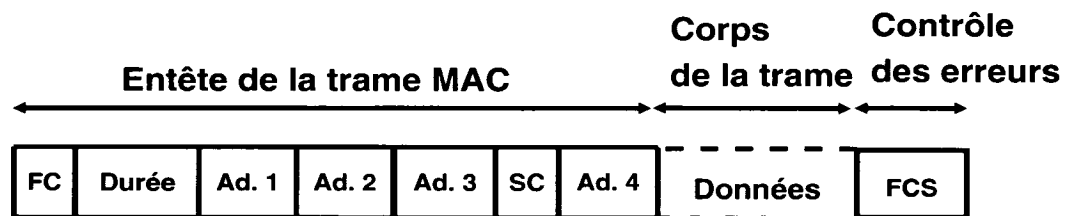


FIG. I.1 Format d'une trame MAC

Certains de ces champs, comme « adresse 2 », « adresse 3 », « adresse 4 », « sequence control » et le corps de la trame, sont présents uniquement dans certaines trames.

Frame Control (FC) : Ce champ a plusieurs sous-champs indiquant les informations de contrôle essentielles pour la transmission de données. Les détails de chaque sous-champ se trouvent dans la norme [1].

Durée : Ce champ de 16 bits de longueur permet d'établir la durée pour la transmission d'une trame de données. C'est cette information qui permet de réaliser la configuration de l'indicateur de temps NAV des autres STAs qui partagent le médium.

Adresse X : Ces quatre champs de 48 bits de longueur chacun permettent d'identifier les adresses MAC suivantes :

- L'adresse de la destination finale de la trame (DA)
- L'adresse de la source originale de la trame (SA)
- L'adresse de la STA qui transmet, cette dernière pouvant être un noeud intermédiaire dans la transmission (TA) dans les réseaux ad-hocs.
- L'adresse de la STA qui reçoit, cette dernière pouvant être un noeud intermédiaire dans la transmission (RA) dans les réseaux ad-hocs.
- L'identité du BSS (BSSID) permet identifier chaque WLAN.

Sequence Control (SC) : Ce champ de 16 bits possède deux sous-champs indiquant le numéro de séquence d'une trame fragmentée (« Segment Number ») et le numéro de fragment de la trame (« Fragment Number ») si le paquet d'information a été fragmenté avant la transmission.

Le corps de la trame et le FCS : Le corps de la trame, de longueur variable, est l'information usager, qui dépend du type et du sous-type de la trame qui est transmise. D'autre part, le FCS est un champ de 32 bits qui permet la détection de l'intégralité d'une trame reçue en l'absence d'erreurs.

Format des trames RTS, CTS et ACK.- Le format de la trame RTS est représenté dans la figure I.2 et celle des trames CTS et ACK est présentée par la figure I.3.

Le champs de la trame RTS sont :

- Le RA est l'adresse de la station destination.

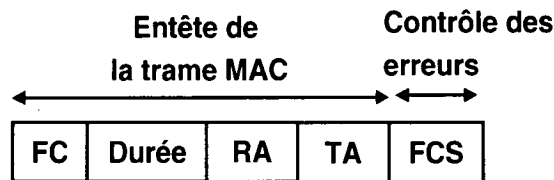


FIG. I.2 Format de la trame RTS

- Le *TA* est l'adresse de la station qui transmet la trame RTS
- La *DURÉE* est le temps total, en microsecondes, requis pour transmettre la trame de données. (i.e, $Durée (\mu s) = t_{CTS} + t_{ACK} + t_{DATA} + 3 \times SIFS$)

Les champs des trames CTS et ACK sont :

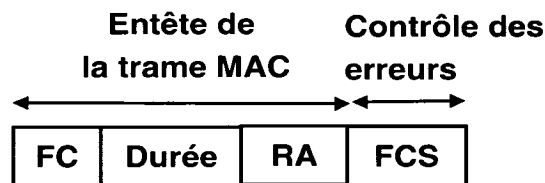


FIG. I.3 Format des trames CTS et ACK

- Les champs de la trame CTS sont :
 - Le *RA* est l'adresse copiée du champ *TA* de la trame RTS qui est reçue.
 - La *DURÉE* est le temps total, en microsecondes, requis pour transmettre la trame de données. Valeur calculée en fonction du champ « *DURÉE* » de la trame RTS moins les valeurs d'un *SIFS* et du temps pour transmettre un CTS.
(i.e, $Durée (\mu s) = t_{ACK} + t_{DATA} + 2 \times SIFS$)
- Les champs de la trame ACK sont :
 - Le *RA* est l'adresse copiée du champ « *Address2* » de la trame reçue.

- Si la trame de données a été fragmentée, le champ *DURÉE* est égal à la valeur du champ *DURÉE* de la trame qui vient d'être reçue. Dans le cas contraire, ce champ est égal à 0.

ANNEXE II

TECHNIQUES POUR LA TRANSMISSION DE DONNÉES

Les canaux de transmissions.- Le spectre de radio réparti entre plusieurs bandes de fréquence, aussi appelées canaux de transmission, pour des utilisations spécifiques de communication. Deux sortes de bandes de fréquence existent : avec licence, où le gouvernement régularise leur utilisation, et des bandes de fréquence pour une utilisation libre, c'est-à-dire ne nécessitant pas de licence. Ces dernières, utilisées par les systèmes sans fil 802.11, sont les « bandes ISM » et les « bandes UNII ».

Les communications de radio traditionnelles utilisaient la totalité de la bande étroite pour transmettre la plus grande quantité de signal. Avec les techniques à étalement de spectre le signal est diffusé à travers une grande gamme de fréquences, c'est-à-dire que ces systèmes utilisent une bande passante plus grande que celle dont ils ont besoin. Pour obtenir cette bande passante plus grande, ces techniques utilisent des codes mathématiques avant la modulation du signal. Ces techniques sont plus solides contre les interférences que les transmissions de bande étroite, et leur utilisation est permise pour les dispositifs opérant dans les bandes de fréquence sans licence. La *Séquence Directe* et *OFDM* sont des exemples des techniques à étalement de spectre.

Technologie « Orthogonal Frequency Division Multiplexing » (OFDM).- L'idée principale de cette technologie est d'encoder une seule transmission en plusieurs sous-porteuses. En effet, les dispositifs OFDM travaillent avec une seule fréquence de canal qui est composée de plusieurs sous-canaux orthogonaux qui transmettent des données. Cette méthode de division des portées de fréquence est semblable au fonctionnement de la méthode « Frequency Division Multiplexing » (FDM). OFDM cherche à superposer les canaux pour transmettre le maximum d'informations sur une portion de fréquence. Cette

superposition des canaux est possible grâce à l'orthogonalité des codes qui permet la séparation des sous-porteuses de fréquence. IEEE 802.11a et IEEE 802.11g sont des normes basées sur OFDM. Les bandes de fréquence utilisées par ces normes sont 5 Ghz et 2.4 Ghz respectivement.

La Séquence Directe avec des Hauts Débits.- En 1999, la publication de la norme IEEE 802.11b cherche l'amélioration des valeurs de débits en créant la modulation « High Rate/Direct Sequence » (HR/DS). Cette dernière utilise la modulation de la norme originale en changeant le codage des données. De plus, une amélioration importante apportée par cette norme est l'utilisation d'une variation dynamique du débit par les équipements IEEE 802.11b en cas des environnements bruyants. Ceci permet d'ajuster les taux de transmission automatiquement pour compenser les variations du canal radio. Dans une situation sans problèmes, les utilisateurs se connectent à un taux maximum de 11 Mbps. Cependant, en cas d'interférences importantes, les équipements transmettent à des vitesses inférieures de 5.5 Mbps, 2 Mbps et 1 Mbps. De la même façon, la vitesse de la connexion est accélérée automatiquement lorsque les conditions redeviennent favorables.

ANNEXE III

LE SIMULATEUR NS-2

III.1 Généralités

NS est un simulateur développé par les laboratoires LBNL (*Lawrence Berkeley National Laboratory*), USC/ISI (*University of Southern California/Information Science Institute*), Xerox PARC et UCB (*UC Berkely*). Le projet initial, nommé le « VINT Project » (*Virtual InterNetwork Testbed*), utilise les langages C++ et OTcl pour donner naissance à un simulateur multi-protocole qui fait des simulations de l'Internet et de la suite TCP/IP. Cependant, il est devenu rapidement un des plus importants outils pour les recherches dans tous les domaines de réseaux.

NS-2 possède une architecture hiérarchique, ce qui a permis son extension à de nouveaux protocoles (FTP, UDP, telnet, . . .), des nouveaux supports de transmission (LAN, WLAN, SATELLITE, . . .) ainsi que certaines architectures de QoS, comme par exemple DiffServ ou IntServ. Cette caractéristique hiérarchique a permis par la suite le développement du module des transmissions dans les réseaux sans fil. Par contre, il existe très peu d'information et manuels pour les programmeurs, ce qui rend la compréhension du simulateur difficile pour les usagers débutants. Pour l'apprentissage et compréhension de NS-2 ainsi que pour le développement des scripts, les informations retrouvées sur des mailing-lists [81] et les manuels [82–85] ont été utilisées.

Comme on le constate dans la Figure III.1, le fonctionnement d'une simulation avec NS-2 est résumé par les indications suivantes :

1. L'utilisateur doit écrire un script en Tcl où se trouvent toutes les commandes et ordres qu'il veut exécuter.
2. Le simulateur utilise le *calendrier d'événements* pour déterminer l'avancement du temps et les *bibliothèques ou libraries* écrites en C++ pour la création de la topologie du réseau, les protocoles et les applications.
3. Le résultat de la simulation est un fichier de trace dans lequel on peut soustraire les statistiques et un fichier de trace qui montre la simulation graphiquement avec le logiciel NAM (Network Animator).

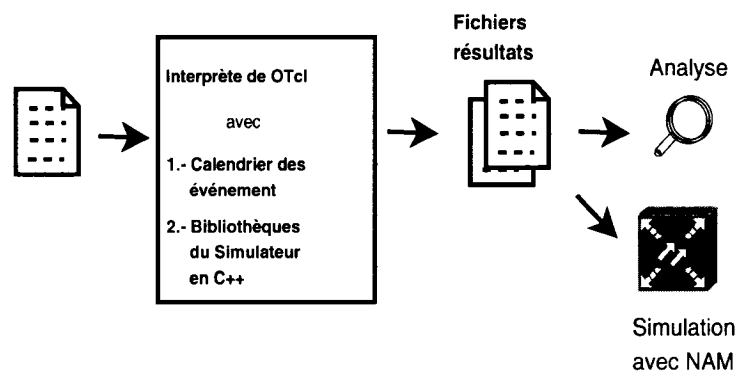


FIG. III.1 Fonctionnement simplifié du Simulateur NS-2

III.2 Les composantes d'un réseau en NS-2

Pour réaliser un réseau câblé ou sans fil avec le simulateur NS-2, le script doit créer certaines composantes de réseau comme le noeud, le lien, la file d'attente, entre autres à partir de classes et bibliothèques en C++. Le réseau le plus simple, montré dans la Figure III.2, est celui qui permet la communication entre deux noeuds. Les composantes existantes dans ce réseau sont : l'application, l'agent (source et puits), les noeuds avec ses tampons et le lien. Entre ces composantes, il existe des liens logiques et des liens physiques qui doivent être créés dans le script pour simuler le réseau. Par la suite, une courte explication de chaque classe utilisée dans ce simple réseau est présentée.

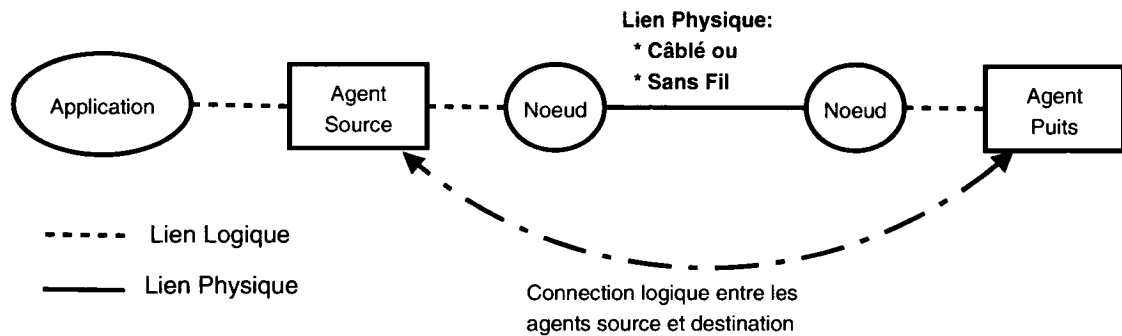


FIG. III.2 Principales composantes d'un réseau en NS-2

- **La classe application** qui génère les protocoles de la couche « Application », c'est-à-dire qu'elle crée les sources de trafic utilisées dans la simulation comme des trafics CBR, FTP, Exponentiels, entre autres.
- **Les agents de communication** représentent les protocoles de transport (TCP, UDP). Pour réaliser une communication dans le réseau, on a besoin d'un agent source et d'un agent puits pour permettre l'échange des données. Ces agents sont attachés logiquement aux noeuds sources et destinations et aussi attachés logiquement à la classe application.
- **Les noeuds du réseau** peuvent être une hôte, un routeur, une passerelle ou une STA. Chaque noeud contient une entrée et un temporisateur qui analyse les champs du paquet pour le diriger vers la bonne interface de sortie. Les STA's mobiles ont une configuration spéciale de la couche MAC et PHY (selon la norme IEEE 802.11) pour permettre leur mobilité.
- **Le lien d'un réseau câblé** sert à relier les noeuds. Il modélise le système de transmission (Point à point, LAN, etc.) et il est caractérisé par un délai de propagation, une bande passante et une file d'attente (« Droptail », « RED » (Random Early Discard), « FQ » (Fair Queueing), etc.).
- **Le lien sans fil** permet la communication entre les STAs mobiles ou entre une STA et un AP. Le lien sans fil est défini par :

1. La *couche MAC* qui est basée sur le mécanisme d'accès au médium CSMA/CA pour la transmission d'information en utilisant des « timers » qui détectent l'activité du médium.
 2. La *couche PHY* qui est formée principalement par la classe « Channel » qui a la fonction de délivrer les paquets entre les noeuds sans fil.
- ***Le temporisateur ou calendrier*** : se crée au début de la simulation et programme chaque événement qui sera exécuter à des moments précis.
 - ***Le module de Routage*** fait partie de la couche 3 et permet d'établir des règles de routage dans les réseaux câblés (RIP, OSPF, SRM, etc.) et dans les réseaux sans fil (DSDV, AODV, etc.).

ANNEXE IV

LES PRINCIPALES INSTRUCTIONS DU SCRIPT

Les instructions nécessaires pour réaliser une simulation du réseau sans fil dans NS-2 sont :

Première Instruction : obligatoire et génère un objet simulateur NS. Cet objet est chargé d'initialiser le format du paquet et de créer le calendrier pour les événements de la simulation. La configuration de cette instruction est : `set ns_ [new Simulator]`

La topologie câblée : Les composantes du script pour créer le réseau câblé sont :

- `set node1 [$ns node]` permet la création d'un noeud nommé *node1*
- `$ns type-link node1 node2 bandwidth delay queue-type` crée les liens entre les noeuds *node1* et *node2*. Le lien peut être simplex ou duplex (« type-link ») avec une bande passante (« bandwidth »), un délai de propagation (« delay ») et un type de file d'attente (« queue-type »).
- `$ns queue-limit node1 node2 size` permet limiter la taille (« size ») du tampon de la file d'attente du lien entre les noeuds *node1* et *node2*.

La topologie sans fil : La configuration du réseau sans fil 802.11 est complètement différente à la topologie câblée et un peu plus compliquée. Les étapes à suivre sont les suivantes :

1. Tout d'abord, il faut définir les caractéristiques des liens sans fil telles que le type du canal, le modèle de propagation, l'interface du réseau, la type de MAC, l'interface de la queue, le type de la couche LL (Link Layer), le modèle d'antenne et le nombre maximal de paquets dans la queue du tampon. La configuration dans

NS-2 est la suivante :

```

set opt (chan)      Channel/WirelessChannel ;
set opt (prop)      Propagation/TwoRayGround ;
set opt (netif)      Phy/WirelessPhy ;
set opt (mac)        Mac/802_11 ;
set opt (ifq)        Queue/DropTail/PriQueue ;
set opt (ll)         LL ;
set opt (ant)        Antenna/OmniAntenna ;
set opt (ifqlen)     5000
set opt (adhocR)     DSDV

```

2. Ensuite, il faut configurer les paramètres de la couche MAC de la norme 802.11 b/g et de la plupart des dispositifs sans fil commerciaux, c'est-à-dire un taux de transmission de paquets de données de 11 Mbps ou 56 Mbps et un taux de transmission de paquets de contrôle de 2 Mbps ou 6 Mbps. Dans les simulations, on a établi le mécanisme d'accès DCF sans RTS-CTS en configurant l'activation du mécanisme à partir du seuil de la taille de paquet très grande pour désactiver le mécanisme en NS-2. La configuration en NS-2 est présentée par la suite :

```

Mac/802_11 set  dataRate_ 11.0e6
Mac/802_11 set  basicRate_ 2.0e6
Mac/802_11 set  RTSThreshold_ 3000
Mac/802_11 set  PreambleLength_ 72
Mac/802_11 set  PLCPHeaderLength_ 48
Mac/802_11 set  PLCPDataRate 1.0e6

```

3. D'autre part, la configuration originale de NS-2 de la couche PHY est faite principalement à partir de seuils (« thresholds ») pour déterminer si une trame est reçue correctement. « CStHrest » est la valeur pour déterminer si la trame est détectée par le récepteur ; « RXThrest » est la valeur qui détermine la puissance du signal reçu. Cependant, il faut changer les configurations anciennes du réseau WLAN de NS-2 qui ne sont plus valables dans les réseaux 802.11 actuels. Les forums [81, 86, 87] ont été utilisés pour établir la configuration suivante qui doit être écrite dans le script TCL.

```
Phy/WirelessPhy set bandwidth_ 11Mb
Phy/WirelessPhy set L_ 1.0
Phy/WirelessPhy set freq_ 2.472e9
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.031622777
Phy/WirelessPhy set CPTresh_ 10.0
Phy/WirelessPhy set CStresh_ 5.011871e-12
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 1.15126e-10
```

4. À la suite de ces configurations, il faut définir la création de l'objet GOD (« General Operations Director »), qui accumule les informations de la simulation (la quantité des noeuds, l'information de la connectivité, etc.) comme un observateur omniscient. `create-god [expr number_of_nodes + number_of_BS]`
5. La commande pour la création des stations et des BS dans les simulations des réseaux sans fil est la même que pour les noeuds dans les réseaux câblés. Il faut simplement spécifier les configurations suivantes pour indiquer les caractéristiques des stations mobiles :

```
$ns_ node-config -adhocRouting $opt(adhocR)
                  -llType $opt(ll)
                  -macType $opt(mac)
                  -ifqType $opt(ifq)
                  -ifqLen $opt(ifqlen)
                  -antType $opt(ant)
                  -propType $opt(prop)
                  -phyType $opt(netif)
                  -channel $chan_1_
                  -topoInstance $topo
                  -wiredRouting ON
```

Pour plus d'informations et détails sur la création et configuration des réseaux sans fil, le lecteur peut consulter [82].

L'agent utilisé : définit le protocole de transport du réseau. Pour les simulations de cette étude, le protocole utilisé est UDP où on définit un agent source et un agent puits pour

évacuer les paquets. La configuration de l'agent source UDP, nommé *udp0* et attaché au noeud *node1*, est la suivante :

```
set udp0 [new Agent/UDP]
$ns attach-agent $node1 udp0
```

L'agent puits, attaché au noeud destination (*node2*), est connecté logiquement à l'agent source pour établir la transmission d'information. Le protocole UDP ne fait pas d'acquittements et le puits sera donc l'agent NULL dans la configuration suivante :

```
set null [new Agent/NULL]
$ns attach-agent $node2 null
$ns connect $udp0 null
```

L'application : est celle qui permet de définir la source de trafic qui émettra un noeud. Elle est liée logiquement à l'agent UDP pour lui permettre de transmettre le flot qu'elle génère. Les configurations utilisées pour la création des flots de VoIP, de vidéo et des données.

Le trafic de VoIP : est généré avec une source de distribution exponentielle ON/OFF existante en NS-2. Les caractéristiques sont la taille de paquets, le temps d'activité, le temps de repos et le débit.

```
set voip [new Application/Traffic/Exponential]
$voip set packetSize_ size
$voip set burst_time_ burst
$voip set idle_time_ idle
$voip set rate_ rate
$voip attach-agent $udp0
```

Le trafic de Vidéo : est généré à partir des traces trouvées dans [62]. Dans NS-2, il faut convertir la trace de vidéo en trace binaire, qui indique au simulateur la taille des paquets et l'instant où ils devront être générés. Plus de détails sur la configuration du trafic de vidéo se trouvent avec le fichier de trace de vidéo.

Le trafic de Données : est une source constante (CBR), où la taille des paquets « size » ainsi que le taux de transmission « rate » seront définies par l'utilisateur.

```
set cbr [new Application/Traffic/CBR]
$cbr set type_ CBR
$cbr set packet_size_ size
$cbr set rate_ rate
$cbr attach-agent $udp0
```

ANNEXE V

ANALYSE DE LA TRACE DE LA SIMULATION

Le fichier de résultat contient toutes les informations relatives à chaque simulation. On retrouve par exemple tous les événements produits par les sources, les temps de passage des paquets par chacun des noeuds, l'état des paquets, le temps d'arrivée et les numéros de séquence. Le format de cette trace est défini par le simulateur selon le type de réseau, sans fil ou câblé. La trace des réseaux sans fil a une partie commune à tous les paquets et une partie de la trace qui dépend du type de paquet (CBR, ARP, IP, etc.). Pour les détails de cette dernière partie, on conseille aux lecteurs de consulter la documentation de NS-2, [82].

Exemples de lignes de trace d'un réseau câblé :

<i>1.- Exemple d'une ligne de trace d'un réseau câblé :</i> r 1.5303 1 0 exp 100 ----- 0 1.0.1.0 0.1.0.0 103 10											
r	1.5303	1	0	exp	100	-----	0	1.0.1.0	0.1.0.0	103	10
Event	Time	Src node	Dest. node	Pkt type	Pkt size	Flags	Flow ID	Src Addr.	Dest. Addr.	Seq. Numb.	Pkt ID
<i>2.- Exemple de trace d'un réseau sans fil, paquet IP :</i> r 1.53 _1_ MAC -- 10 exp 80 [a2 0 1 800] ----- [4194305 :0 2048 :0 32 0]											
Partie commune pour traces sans fil						Partie de la Trace qui change en fonction du type de paquet					
r	1.53	_1_	MAC	—	10	exp	80	a2	0	1	800
Event	Time	Node ID	Trace Name	Rsn	Pkt ID	Pkt Type	Pkt Size	Time to send	Dest. MAC Addr.	Src MAC Addr.	Type

Chaque champ ou colonne de ces lignes de trace donne une information sur un événement qui se produit dans le réseau. Les explications de chaque champ de la trace pour

un paquet qui traverse un réseau câblé se trouvent dans le Tableau V.1 tandis que celles de la partie commune de la trace du réseau sans fil se trouvent dans le Tableau V.2.

Champs	Type d'événement produit par le paquet dans le réseau
Event	<p>Quatre états possibles :</p> <p>+ : Entrée du paquet dans la file d'attente</p> <p>- : Sortie de la file d'attente</p> <p>r : Réception du paquet dans le noeud "to node"</p> <p>d : Rejet du paquet de la file d'attente.</p>
Time	Instant où se produit l'événement
Src. Node	Noeud de départ du lien
Dest. Node	Noeud d'arrivée du lien
Pkt. Type	Type du paquet (i.e. du trafic) prend les valeurs de cbr, exp, etc.
Pkt. Size	La taille du paquet en octets
Flags	Drapeaux utilisés dans certains protocoles pour donner plus des précisions de la simulation (voir [82])
Flow ID	Numéro ou identité de flot
Src. Address	Adresse de la source et numéro de port utilisé (adresse.port) <i>Dans l'exemple : adresse = 1.0.1 et port = 0</i>
Dest. Address	Adresse de la destination et numéro de port utilisé (adresse.port) <i>Dans l'exemple : adresse = 0.1.0 et port = 0</i>
Seq. Number	Numéro de séquence du flot
Pkt. ID	Identité unique du paquet dans le réseau et dans la simulation

TAB. V.1 Champs d'un fichier de trace d'un réseau câblé

Champs	Type d'événement produit par le paquet dans le réseau
Event	Type d'événement produit par le paquet dans le réseau. Quatre états possibles : s : Envoi du paquet du noeud "NodeID" r : Réception du paquet par le noeud "NodeID" f : Réexpédition du paquet vers autre destination D : Rejet du paquet
Time	Instant où se produit l'événement
NodeID	Identité du noeud où se produit l'événement
Trace Name	Indique le niveau où l'événement se produit : L'agent (AGT), le Router (RTR) ou la couche MAC (MAC).
Rsn	Drapeaux utilisés dans certains protocoles pour donner plus des précisions de la simulation
Pkt. ID	Identité unique du paquet dans le réseau et dans la simulation
Pkt. Type	Type du paquet (i.e. du trafic) prend les valeurs de cbr, exp, etc.
Pkt. Size	La taille du paquet en octets
Time to send	Temps prévu pour envoyer le paquet à travers le canal sans fil. Valeur en hexadécimal (<i>Dans l'exemple "a2" est équivalent à 162s</i>)
Dest. Addr.	Identité du noeud destination
Src. Addr.	Identité du noeud source
Type	Type de paquet. (<i>Dans l'exemple 0x0800 indique qu'il s'agit d'un paquet ETHERTYPE_IP</i>)

TAB. V.2 Champs d'un fichier de trace d'un réseau WLAN : partie commune

Pour mieux comprendre comment se présentent les champs du fichier trace, l'extrait suivant d'une trace illustre le cheminement d'un paquet CBR de son départ à la source jusqu'à son arrivée à destination.

```

L.1 | s 2.688000000 _36_ AGT -- 246 cbr 1000 [0 0 0 0] -----
    | [4194319 :0 30720 :0 32 0] [86] 0 0
L.2 | s 2.688615000 _36_ MAC -- 246 cbr 1063 [13a 0 f 800] ---
    | [4194319 :0 30720 :0 32 4194304] [86] 0 0
L.3 | r 2.689569182 _21_ MAC -- 246 cbr 1020 [13a 0 f 800] ---
    | [4194319 :0 30720 :0 32 4194304] [86] 1 0
L.4 | s 2.689579182 _21_ MAC -- 0 ACK 38 [0 f 0 0]
L.5 | + 2.689594 21 0 cbr 1020 ----- 0 1.0.15.0 0.15.0.0 86 246
L.6 | - 2.689594 21 0 cbr 1020 ----- 0 1.0.15.0 0.15.0.0 86 246
L.7 | r 2.689676 21 0 cbr 1020 ----- 0 1.0.15.0 0.15.0.0 86 246

```

```

L.8 | + 2.689676 0 15 cbr 1020 ----- 0 1.0.15.0 0.15.0.0 86 246
L.9 | - 2.689676 0 15 cbr 1020 ----- 0 1.0.15.0 0.15.0.0 86 246
L.10 | r 2.689757 0 15 cbr 1020 ----- 0 1.0.15.0 0.15.0.0 86 246
L.11 | r 2.689883182 _36_ MAC -- 0 ACK 38 [0 f 0 0]

```

Le **paquet 246**, de type CBR et de taille de 1000 octets, est envoyé par le noeud 36 à l'instant 2.688 s (Ligne 1). Ensuite, il est envoyé par la couche MAC du même noeud à l'instant 2.688615 s (Ligne 2). Il est à noter que la taille du paquet a été modifiée puisque le simulateur a ajouté les entêtes des protocoles IP (20 Octets), MAC (28 Octets) et le préambule de la couche physique (15 octets). Le paquet est transmis par le lien sans fil et reçu par la couche MAC du noeud 21 (BS) à l'instant 2.689569182 s (Ligne 3). Cette couche envoie immédiatement un acquittement ACK de taille 38 octets pour indiquer à la source que le paquet a été reçu correctement (Ligne 4). Le noeud source reçoit l'acquittement à l'instant 2.689883182 s, comme indique la ligne 11. Le paquet se trouve alors dans le réseau câblé. Le paquet entre dans la file d'attente du lien entre les noeuds 21 et 0 au temps 2.689594 s. Il sort de la file d'attente (Ligne 6) sans attendre puis il est reçu par le noeud 0 à l'instant 2.689676 s (Ligne 8). Le paquet continue son chemin jusqu'à sa destination finale, reçu par le noeud 15 au temps 2.689757 s, en passant par la file d'attente du lien entre les noeuds 0 et 15 (Lignes 9 et 10).

Il existe certains cas, où l'événement "d" se présente avec l'identification d'un paquet, signifiant que ce paquet a été rejeté. Ce rejet se produit par différents événements comme une collision dans le lien, une surcharge de la file d'attente, des duplications de paquets, expiration du temps de vie des paquets, entre autres.

Le chevauchement des événements reliés à différents paquets dans un seul fichier trace rend difficile le calcul des critères de performance. De plus, NS-2 ne possède pas d'outils qui permettent réaliser les calculs des statistiques. Des scripts en langage « AWK », qui est un langage indépendant de NS-2, ont donc été développés pour séparer et facilement

analyser chaque événement selon l'identité des paquets envoyés et obtenir les statistiques dont on a besoin.

ANNEXE VI

LES RÉGIONS D'ADMISSION DE VOIP + CBR - VARIATION DU DÉBIT DES SOURCES CBR

Dans cette annexe, les régions d'admission obtenues par simulation en présence de flots de VoIP et des flots de données CBR sont présentées. Chaque figure montre les régions d'admission en présence de sources de VoIP avec un intervalle de paquetisation de 10 ms et des sources CBR avec un débit fixe de transmission. Les figures montrent la variation entre les régions d'admission en variant la taille des paquets entre 1440 Bytes et 100 Bytes.

Les Figures VI.1, VI.2, VI.3 montrent les régions d'admission obtenues pour les réseaux IEEE 802.11b et les Figures VI.4, VI.5, VI.6 pour les réseau IEEE 802.11g.

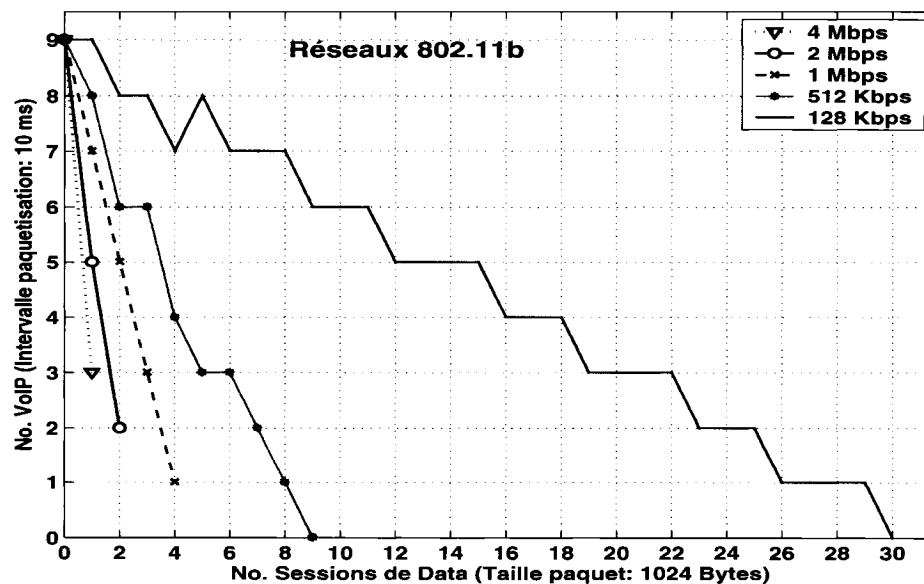


FIG. VI.1 Régions d'admission VoIP + CBR (1024 Bytes) pour 802.11b

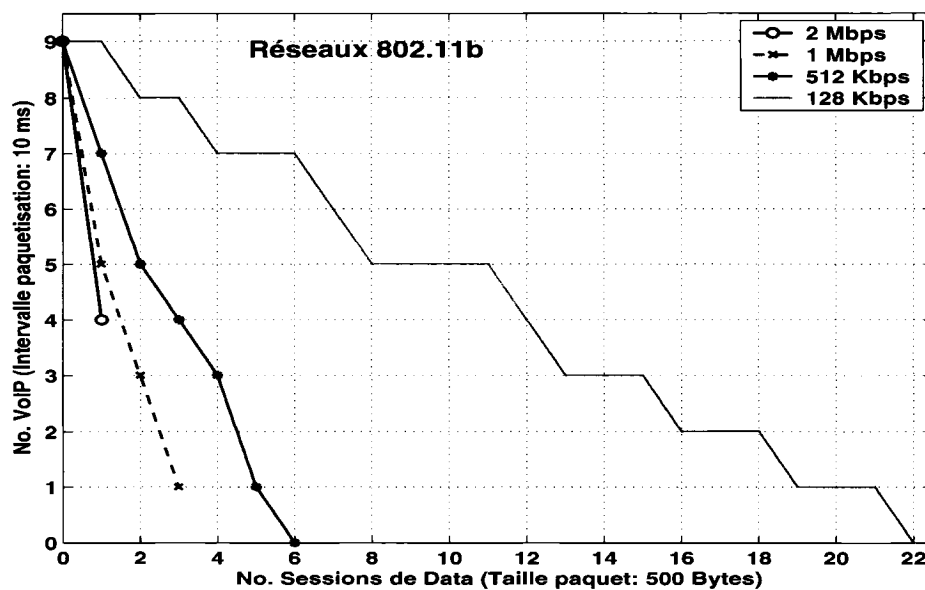


FIG. VI.2 Régions d'admission VoIP + CBR (500 Bytes) pour 802.11b

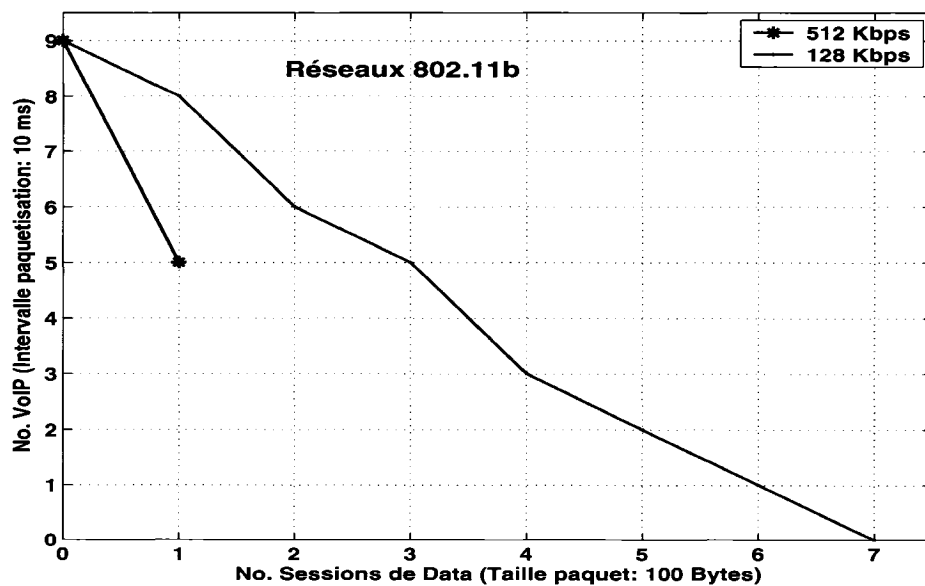


FIG. VI.3 Régions d'admission VoIP + CBR (100 Bytes) pour 802.11b

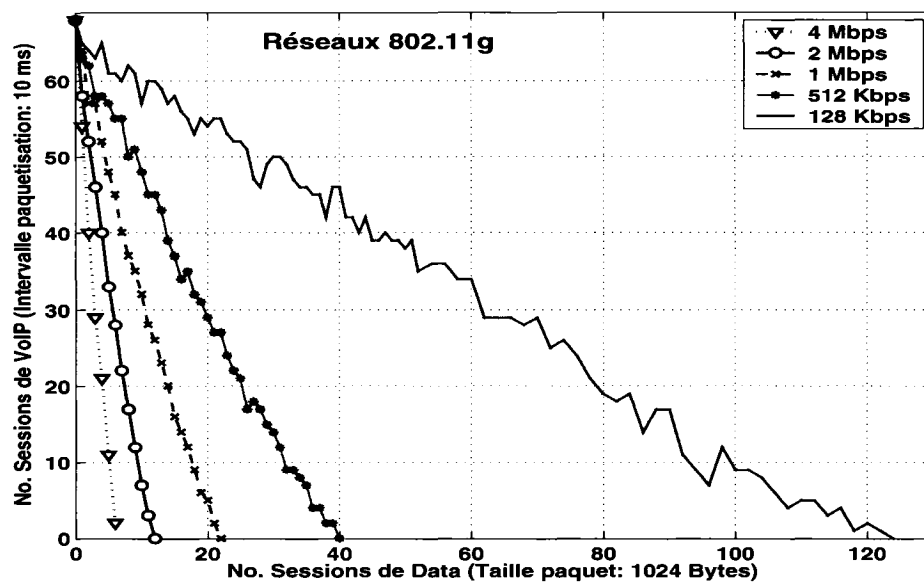


FIG. VI.4 Régions d'admission VoIP + CBR (1024 Bytes) pour 802.11g

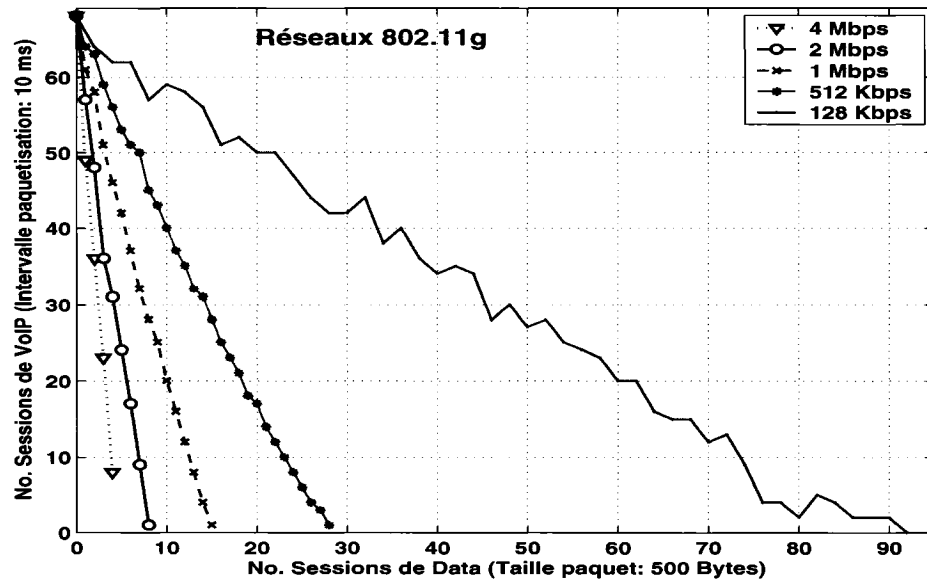


FIG. VI.5 Régions d'admission VoIP + CBR (500 Bytes) pour 802.11g

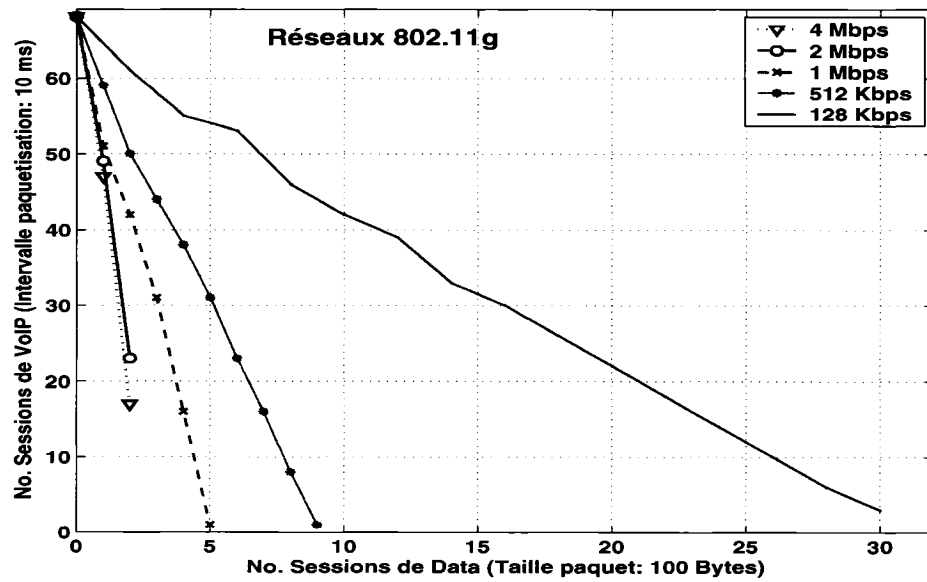


FIG. VI.6 Régions d'admission VoIP + CBR (100 Bytes) pour 802.11g

ANNEXE VII

LES RÉGIONS D'ADMISSION DE VOIP + DATA - VARIATION DE LA TAILLE DES PAQUETS CBR

Dans cette annexe, les régions d'admission obtenues par simulation en présence de sources de VoIP avec un intervalle de paquetisation de 10 ms et des sources CBR. Le débit de transmission de ces sources est fixe pour vérifier l'impact de la taille de paquets qui varie entre 1440 Bytes et 100 Bytes. On présente les figures pour des sources CBR avec un débit de 128 Kbps, 512 Kbps, 1 Mbps, 2 Mbps et 4 Mbps.

Les Figures VII.1, VII.2, VII.3, VII.4 montrent les régions d'admission obtenues pour les réseaux IEEE 802.11b ainsi que les Figures VII.5, VII.6, VII.7, VII.8 celles pour les réseau IEEE 802.11g.

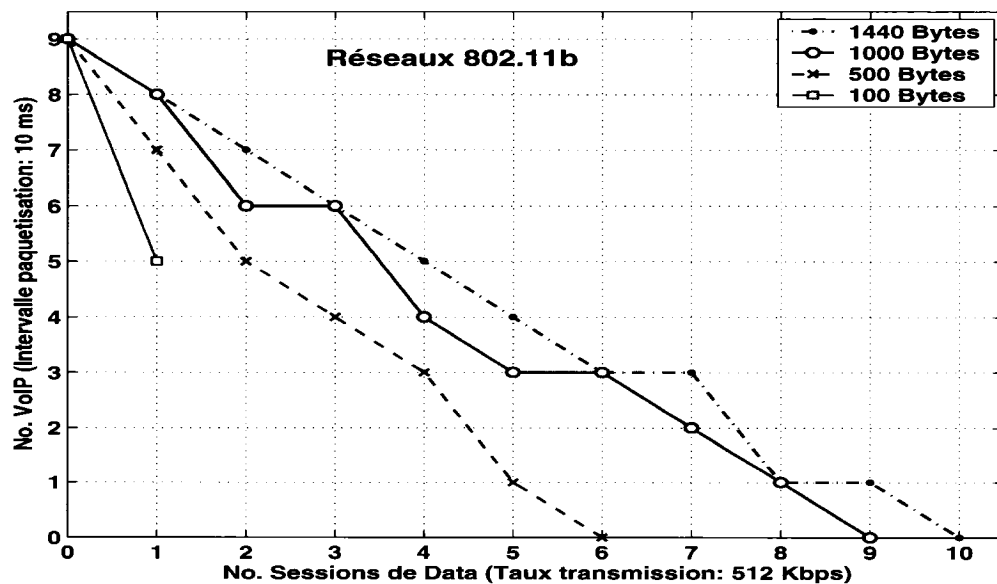


FIG. VII.1 Régions d'admission VoIP + CBR (512 Kbps) pour 802.11b

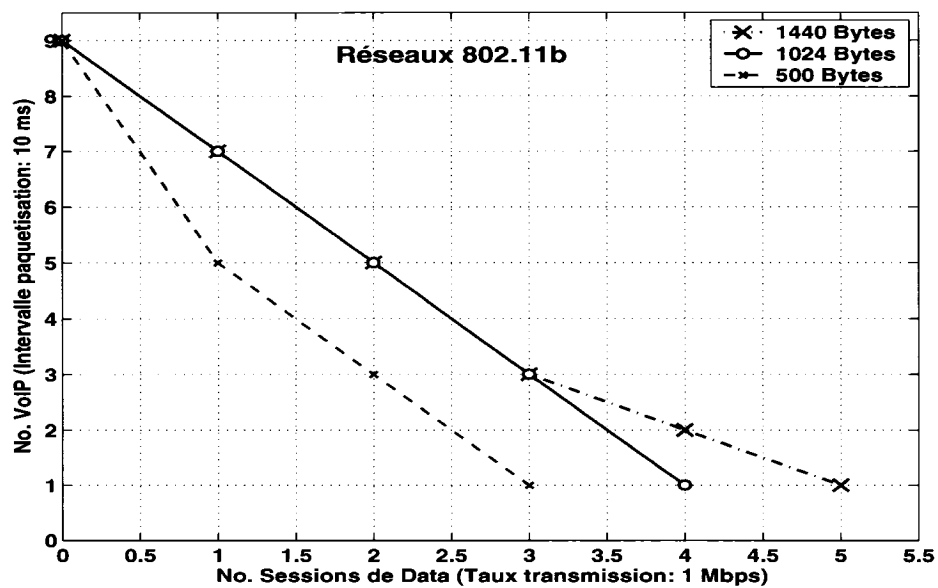


FIG. VII.2 Régions d'admission VoIP + CBR (1 Mbps) pour 802.11b

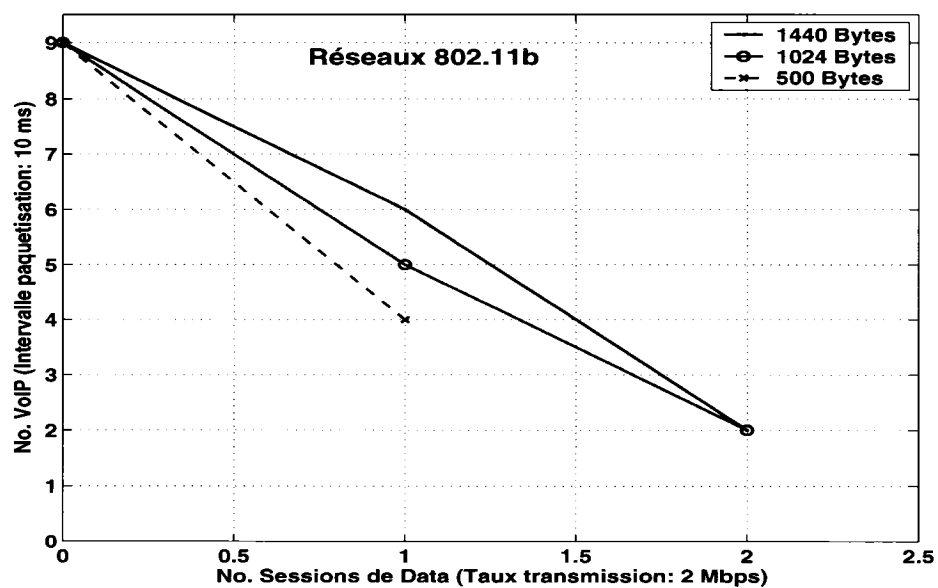


FIG. VII.3 Régions d'admission VoIP + CBR (2 Mbps) pour 802.11b

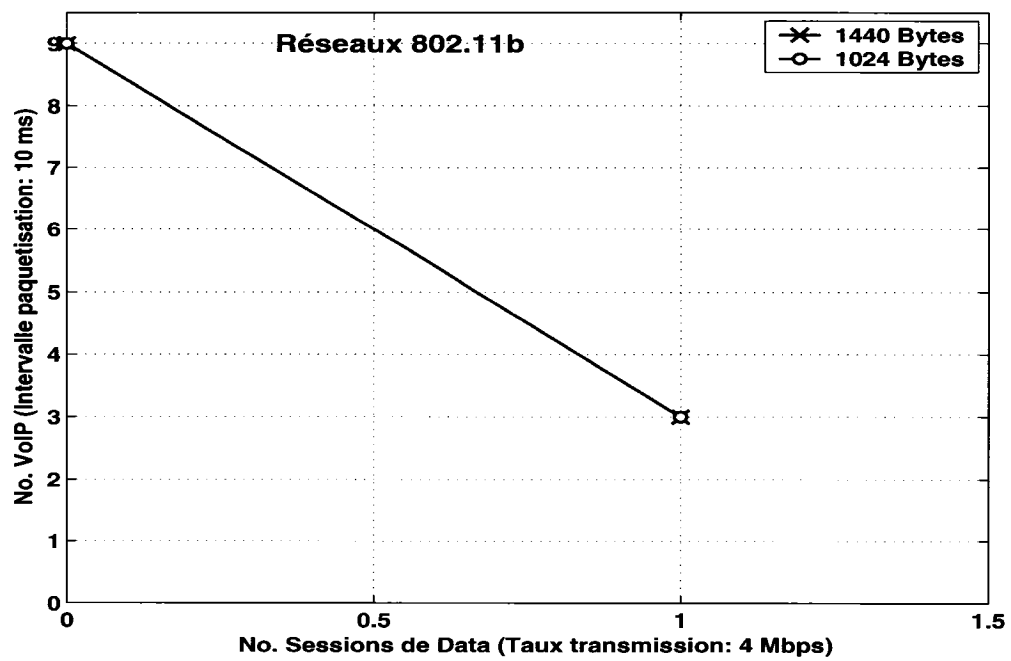


FIG. VII.4 Régions d'admission VoIP + CBR (4 Mbps) pour 802.11b

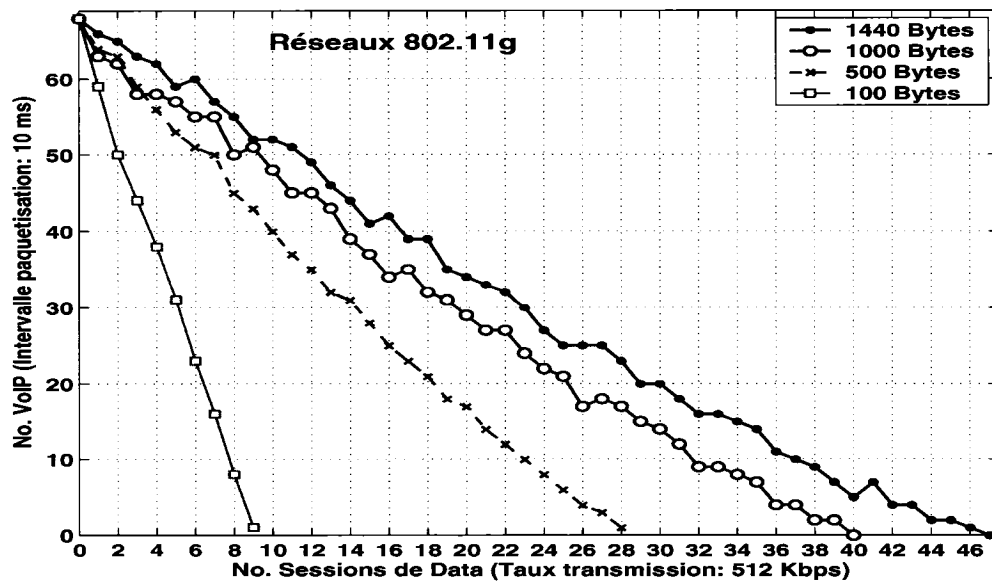


FIG. VII.5 Régions d'admission VoIP + CBR (512 Kbps) pour 802.11g

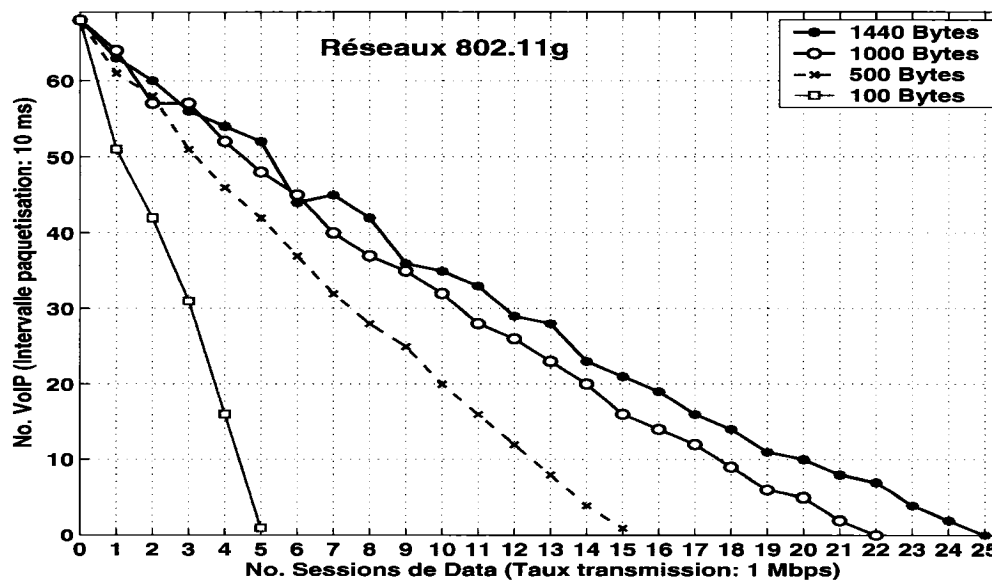


FIG. VII.6 Régions d'admission VoIP + CBR (1 Mbps) pour 802.11g

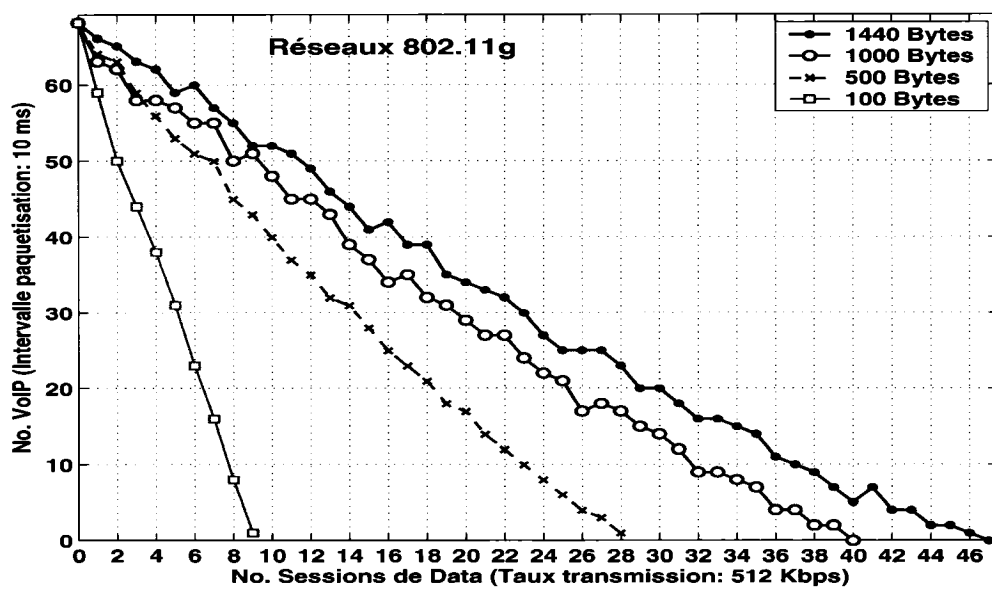


FIG. VII.7 Régions d'admission VoIP + CBR (2 Mbps) pour 802.11g

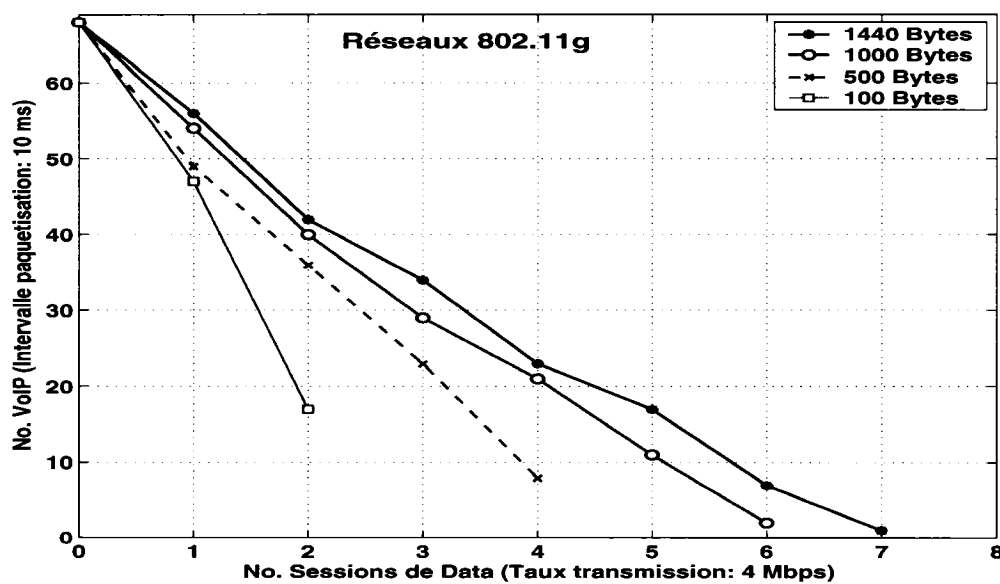


FIG. VII.8 Régions d'admission VoIP + CBR (4 Mbps) pour 802.11g

ANNEXE VIII

LES RÉGIONS D'ADMISSION DE VOIP + DATA - SOURCES CBR EN MODE DESCENDANT

Dans cette annexe, on montre les régions d'admission obtenues par simulation en présence de sources de VoIP avec un intervalle de paquetisation de 10 ms et des sources CBR en mode descendant. Les figures présentent des régions d'admission avec un débit de source fixe et des tailles de paquets qui varient entre 1440 Bytes et 100 Bytes. On présente les figures pour des sources CBR avec un débit de 128 Kbps, 512 Kbps, 1 Mbps, 2 Mbps et 4 Mbps.

Les Figures VIII.1, VIII.2, VIII.3, VIII.4, VIII.5 montrent les régions d'admission obtenues pour les réseaux IEEE 802.11b ainsi que les Figures VIII.6, VIII.7, VIII.8, VIII.5 celles pour les réseau IEEE 802.11g.

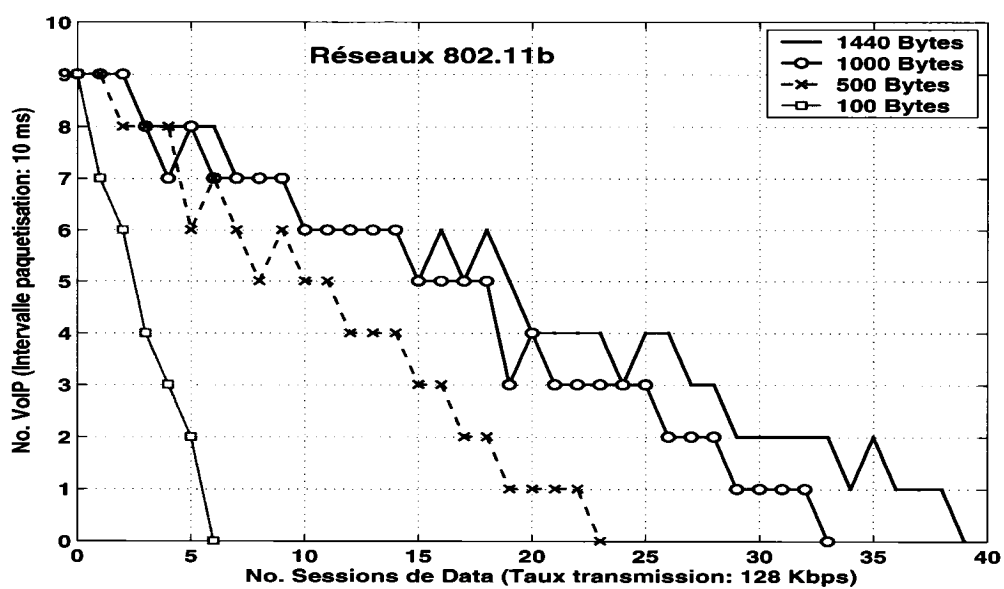


FIG. VIII.1 Régions d'admission VoIP + CBR DN (128 Kbps) pour 802.11b

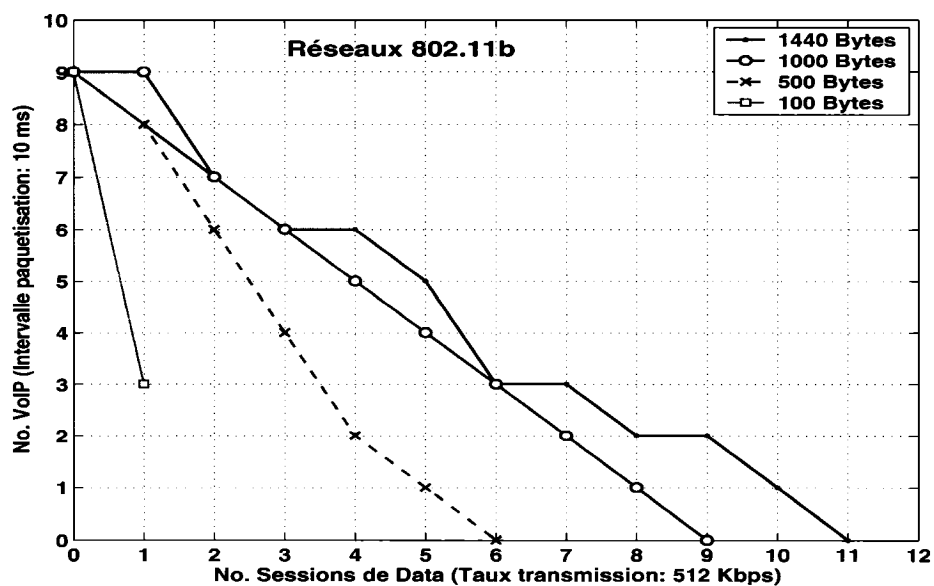


FIG. VIII.2 Régions d'admission VoIP + CBR DN (512 Kbps) pour 802.11b

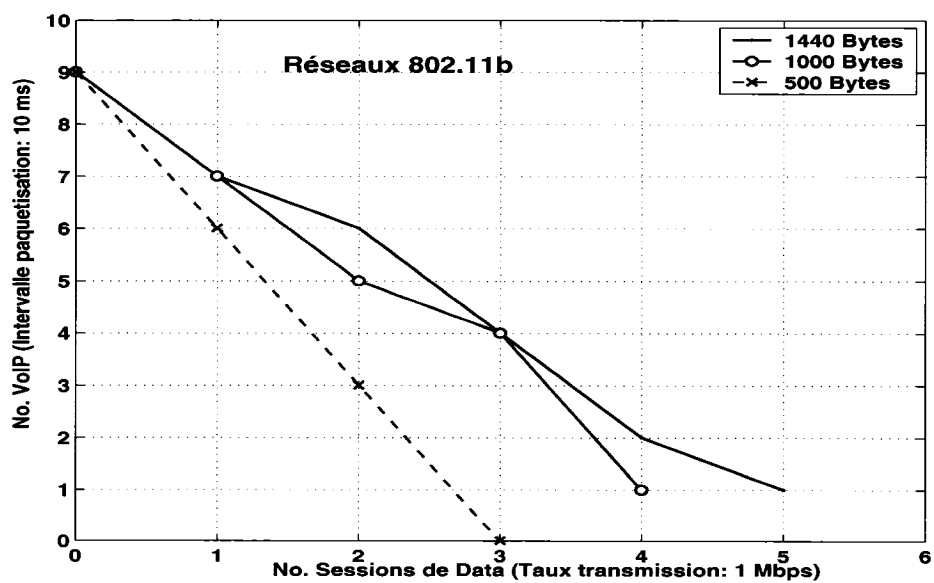


FIG. VIII.3 Régions d'admission VoIP + CBR DN (1 Mbps) pour 802.11b

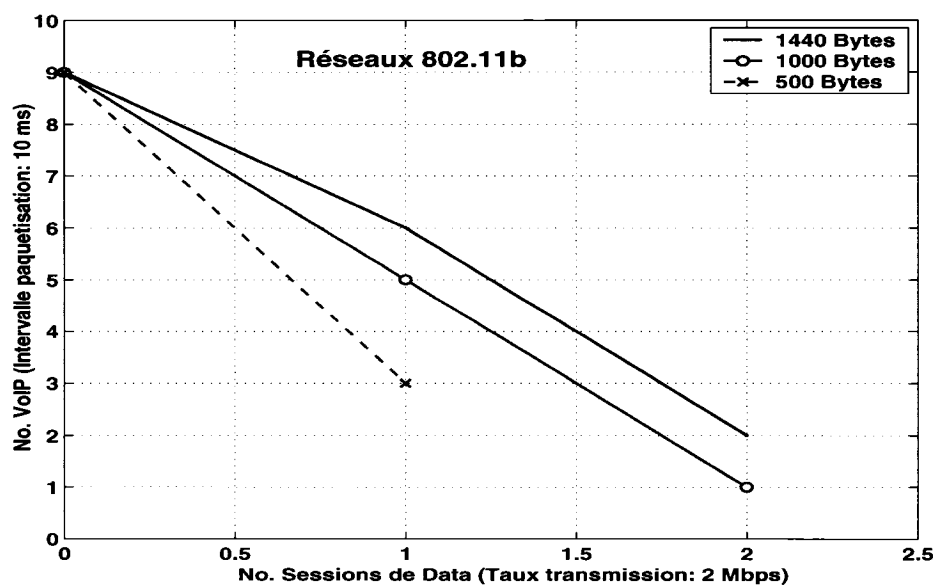


FIG. VIII.4 Régions d'admission VoIP + CBR DN (2 Mbps) pour 802.11b

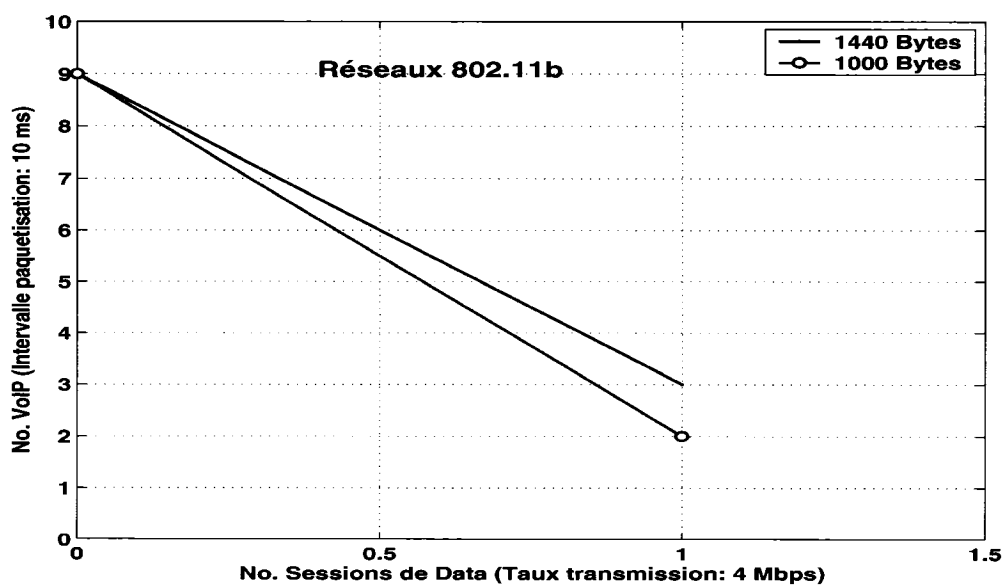


FIG. VIII.5 Régions d'admission VoIP + CBR DN (4 Mbps) pour 802.11b

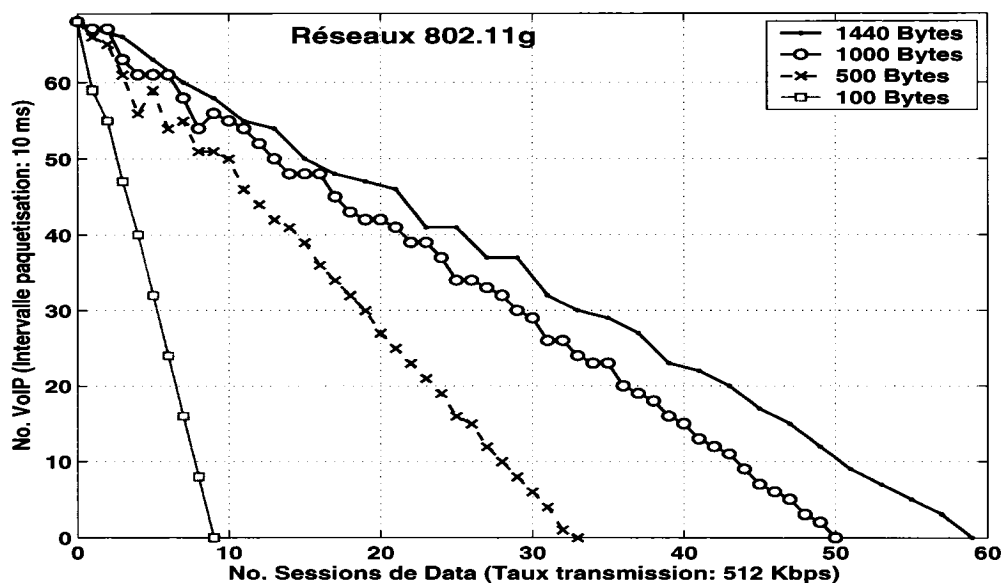


FIG. VIII.6 Régions d'admission VoIP + CBR DN (512 Kbps) pour 802.11g

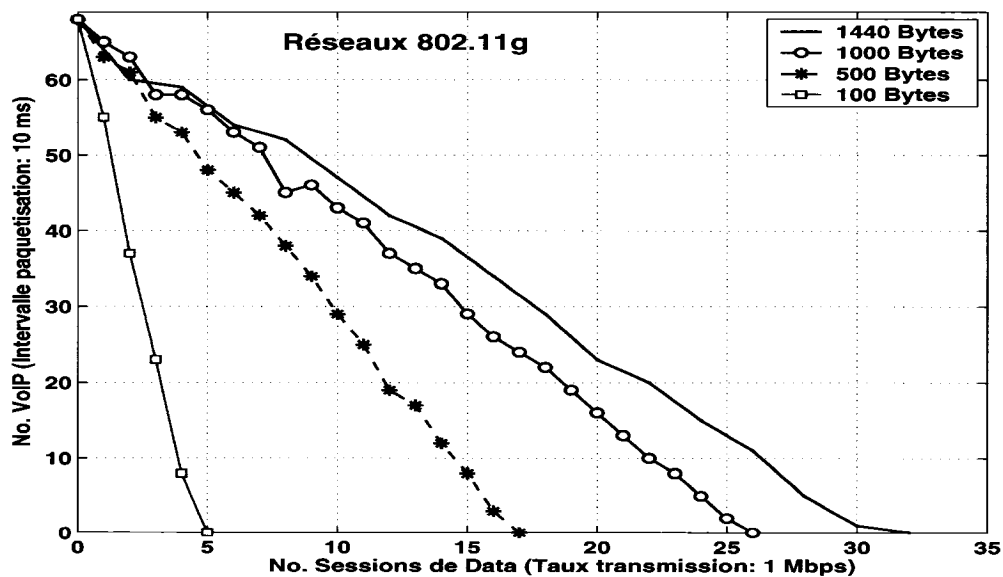


FIG. VIII.7 Régions d'admission VoIP + CBR DN (1 Mbps) pour 802.11g

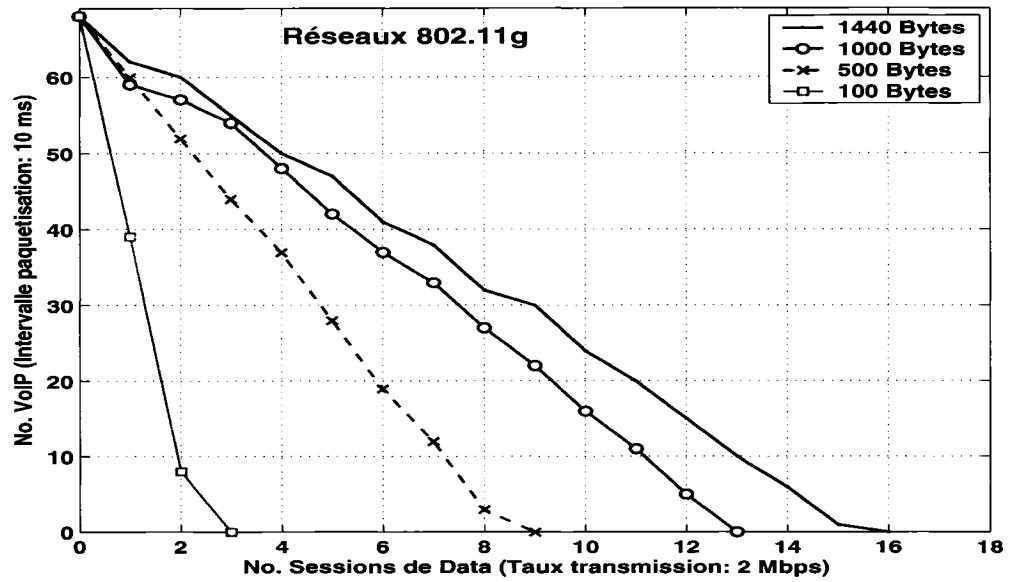


FIG. VIII.8 Régions d'admission VoIP + CBR DN (2 Mbps) pour 802.11g

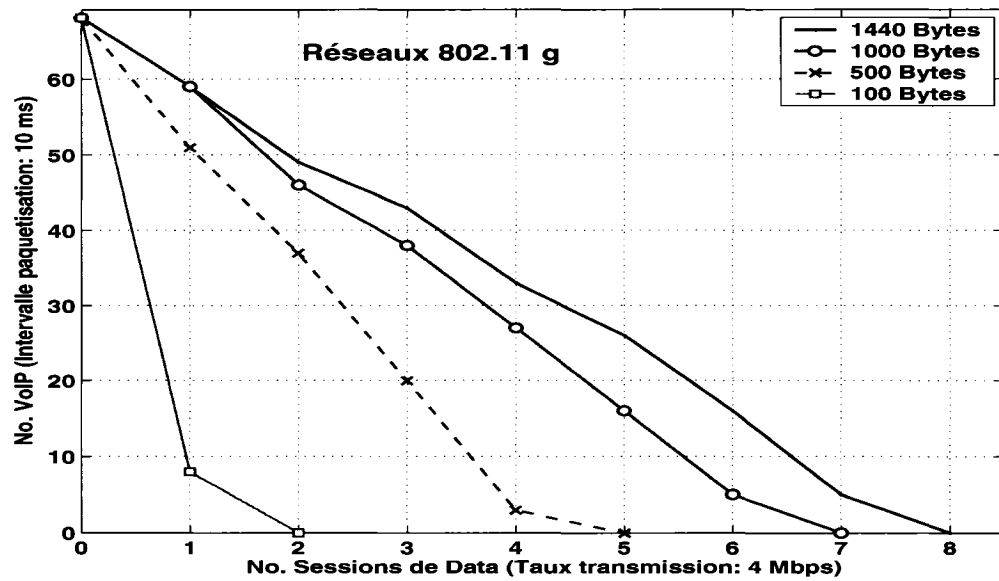


FIG. VIII.9 Régions d'admission VoIP + CBR DN (4 Mbps) pour 802.11g

ANNEXE IX

LA REDÉFINITION DES RÉGIONS D'ADMISSION DE VOIP + DATA - SOURCES CBR EN MODE ASCENDANT

Dans cette annexe, on trouve les régions d'admission retracées en termes de paquets par seconde. Ces dernières sont en présence de sources de VoIP avec un intervalle de paquetisation de 10 ms et des sources CBR en mode ascendant. Les figures présentent des régions d'admission retracées pour chaque taille de paquets variant entre 100 Bytes et 1440 Bytes.

Les Figures IX.1, IX.2, IX.3 montrent les régions d'admission obtenues pour les réseaux IEEE 802.11b ainsi que les Figures IX.4, IX.5, IX.6, celles pour les réseau IEEE 802.11g.

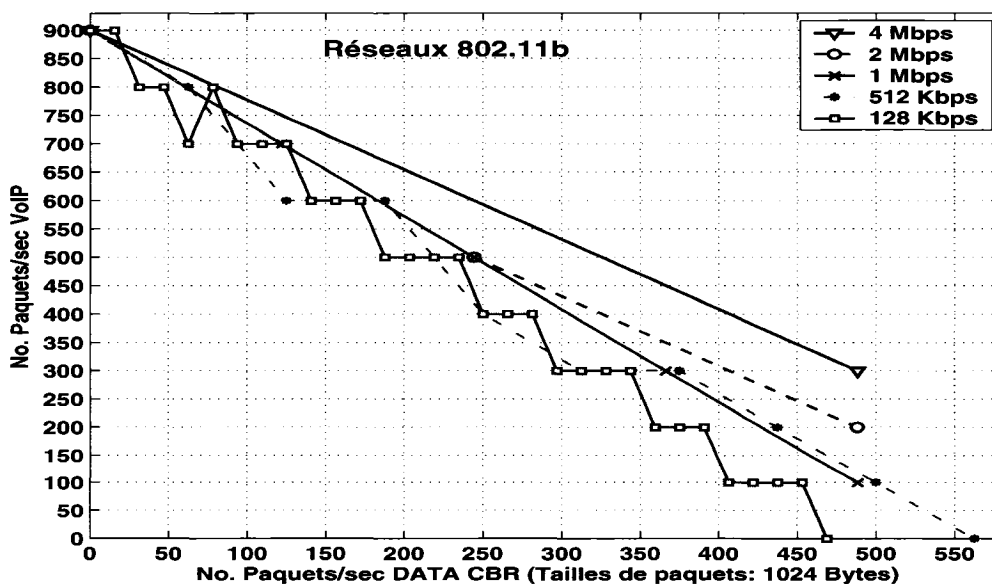


FIG. IX.1 Régions d'admission VoIP + CBR DN (1024 Bytes) pour 802.11b

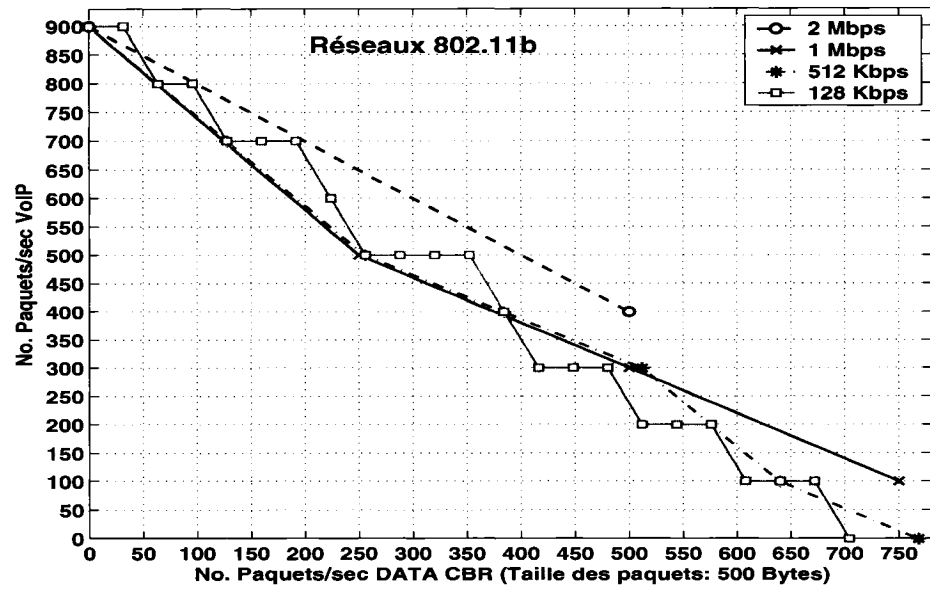


FIG. IX.2 Régions d'admission VoIP + CBR DN (500 Bytes) pour 802.11b

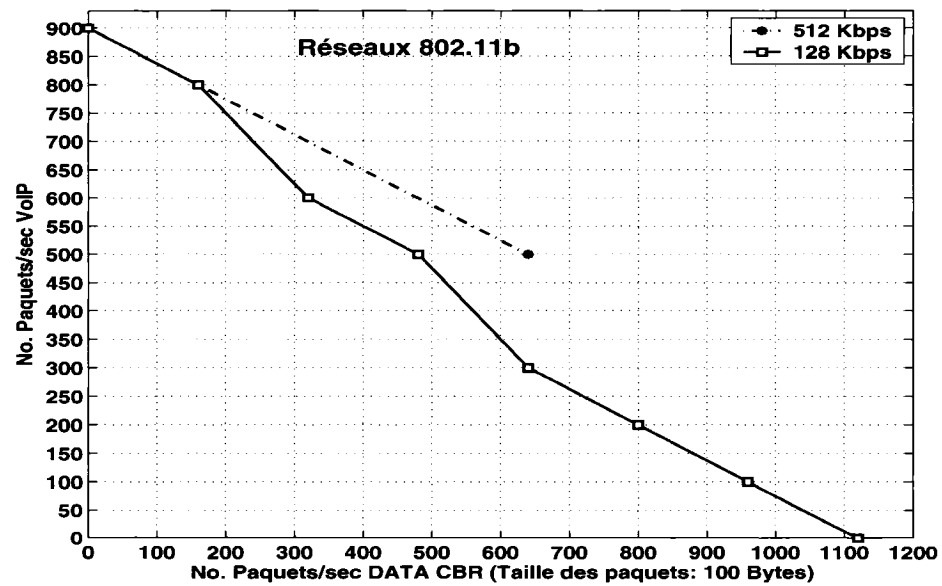


FIG. IX.3 Régions d'admission VoIP + CBR DN (100 Bytes) pour 802.11b

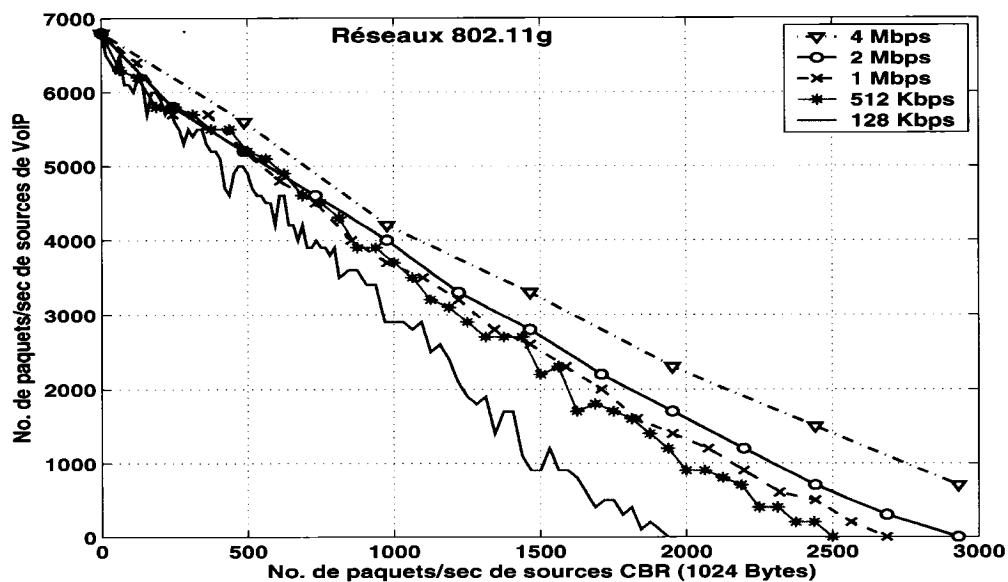


FIG. IX.4 Régions d'admission VoIP + CBR DN (1024 Bytes) pour 802.11g

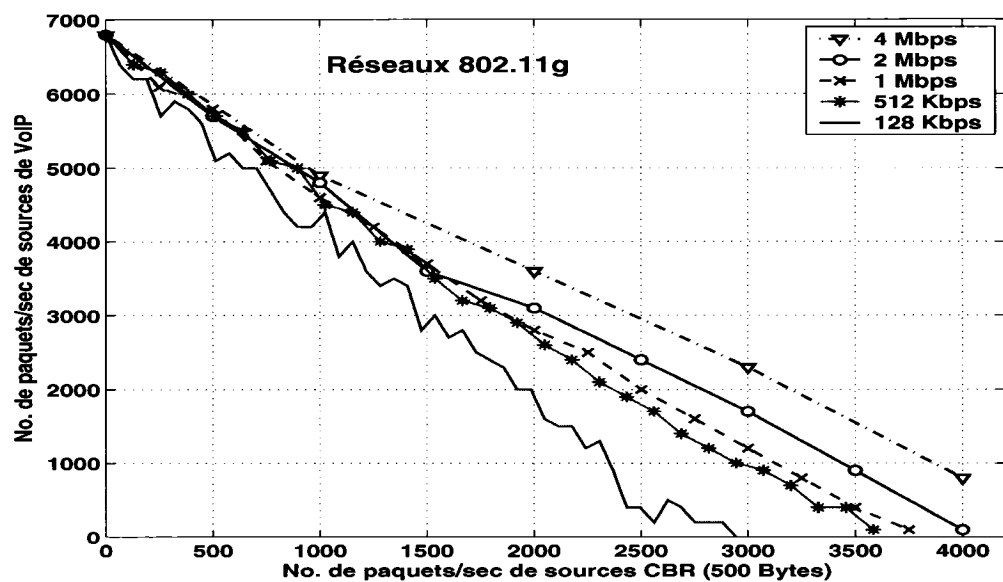


FIG. IX.5 Régions d'admission VoIP + CBR DN (500 Bytes) pour 802.11g

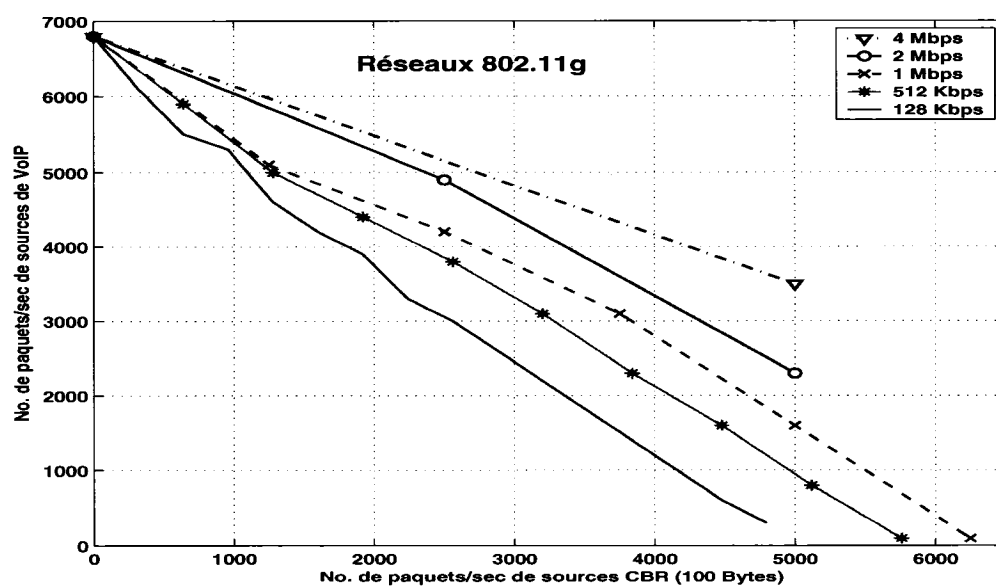


FIG. IX.6 Régions d'admission VoIP + CBR DN (100 Bytes) pour 802.11g